

VESIHALLITUKSEN MONISTESARJA

1982:108

Ravinteiden poisto biologisessa
puhdistuksessa

Väliraportti 3

Matti Valve

1982:108

Ravinteiden poisto biologisessa
puhdistuksessa
Väliraportti 3

Matti Valve

Tekijä on vastuussa julkaisun sisällöstä eikä siihen
voida vedota vesihallituksen virallisena kannanottona.

SISÄLLYSLUETTELO

	sivu
TIIVISTELMÄ	
1. JOHDANTO	1
2. PROSESSIKUVAUS	1
2.1 Yleistä	1
2.2 Matemaattinen tarkastelu	1
3. TUTKIMUKSEN MENETELMÄT	7
3.1 Laitteisto	7
3.2 Näytteenotto ja määritykset	8
3.3 Tutkimuksen aikataulu ja työrutiini	8
3.4 Tulosten käsittely	10
4. TULOKSET JA NIIDEN TARKASTELU	11
4.1 Tulevan jäteveden laatu	11
4.2 Ajoparametrit	11
4.3 Typenpoisto	16
4.4 Fosforin poisto	23
4.5 Orgaanisten yhdisteiden poisto	25
4.6 Jäännöskiintoaine ja rauta	25
4.7 Lietteiden ominaisuudet	25
4.8 Lietteiden tuotto	28
5. JOHTOPÄÄTÖKSET JA YHTEENVETO	31
Kirjallisuus	33
Symbolit ja lyhenteet	

TIIVISTELMÄ

Typen- ja fosforin poistoa tutkittiin kahden vuoden ajan käyttäen aktiivilieteprosessin jaksottaista ilmastusta ja rinnakkaissaostusta ferrosulfaatilla. Keskimääräinen typenpoisto oli n. 50 % ja paras arvo n. 80 %. Kokonaisjäännösfosforipitoisuus oli n. 1,5 mg/l ja liukoinen fosfori n. 0,7 mg/l. Nämä tulokset saavutettiin, kun prosessin kokonaisviipymä oli 13 h, lieteikä 27 d, lietekuormitus 0,059 kg/kg·d, jaksotus 45 min ilmastusaikaa ja 45 min taukoaikaa sekä raudan ja fosforin moolisuhde 2,5. Lämpötila oli 18,5 °C.

Prosessin nitrifikaationopeudet sekä denitrifikaationopeudet olivat alhaisemmat kuin aiemmin kaksiallasprosessilla (dn-prosessilla) tehdyissä tutkimuksissa.

Jaksottaista ilmastusta ei tämän tutkimuksen perusteella voida suositella pyrittäessä korkeatehoiseen typenpoistoon, mutta prosessi lienee käyttökelpoinen kun halutaan estää nitrifioivan laitoksen liian suuri pH:n lasku. Samalla on saavutettavissa 15-20 % säästö ilmastuksen energiakustannuksista, kun osa nitraattiin sidotusta hapesta saadaan uudelleen käyttöön.

Laitoksen mitoituskriteerinä on lieteikä, joka on valittava nitrifikaation ehtojen mukaisesti. Hieno- tai keskikarkeakuplailmastus ei sovellu ilmastimien tukkeutumisen vuoksi.

1. JOHDANTO

Ravinteiden poisto biologisessa puhdistuksessa on vesihallituksen ja Valtion teknillisen tutkimuskeskuksen yhteistyöprojekti, jonka rahoituksesta on vastannut osin vesihallitus ja osin SITRAn YVY-projektin rahoitusjärjestelmä. Projektin tarkoituksena on selvittää erilaisten typenpoistoprosessien ja ferrosulfaatilla tapahtuvan fosforin rinnakkaissaostuksen yhteensopivuutta sekä etsiä Suomen oloihin sopivat mitoituserusteet. Projekti käynnistettiin 1.4.1977 ja tutkimuskohteena oli v. 1977 aikana raudan vaikutus nitri-fioivaan aktiivilieteprosessiin. Tutkimustuloksista on julkaistu väliraportti 1 monisteena v. 1979.

Vuonna 1978 tutkittiin kahta prosessivaihtoehtoa, joissa käytettiin yhtä lietettä ja kahta reaktoriallasta, joista toinen oli aerobinen ja toinen anaerobinen. Näistä tutkimuksista on julkaistu väliraportti no 2 vesihallituksen monistesarjassa no 1981:52.

Tämä väliraportti sisältää vuosina 1979-80 tehtyjä tutkimuksia jaksottaisesta ilmastuksesta. Tutkimukset tehtiin Suomenojan tutkimusasemalla.

2. PROSESSIKUVAUS

2.1 Yleistä

Nitrifikaatio ja denitrifikaatio voidaan periaatteessa toteuttaa yhdessä altaassa yhdellä lietteellä järjestämällä ilmastus jaksottaiseksi. Ilmastusvaiheen aikana tapahtuu nitrifikaatio ja taukoaikana denitrifikaatio, jonka hiililähteenä on tulevan jäteveden sisältämä orgaaninen aines sekä endogeenihengityksessä vapautuvat yhdisteet. Prosessin toiminta muistuttaa osin nitrifikaatio-denitrifikaatioprosessia yhdellä lietteellä mutta kahdessa altaassa tai sellaisia prosesseja, joissa yhteen altaaseen on järjestetty hapettomia vyöhykkeitä. Kaksiallasprosesseihin verrattuna jaksottaisella ilmastuksella saavutetaan seuraavia etuja verrattuna nd- ja dn-prosesseihin:

- nd-prosessin denitrifikaationopeus on huomattavasti hitaampi, jolloin vaaditaan suurempi allastilavuus
- dn-prosessissa vaaditaan suuri kierrätysaste korkeatehoisen typenpoiston saavuttamiseksi. Jaksottaisessa ilmastuksessa kierrätyksen ei tarvitse olla näin voimakkaan.
- rakanteeltaan jaksottainen ilmastus on yksinkertaisempi kuin kaksiallasprosessit.

Epäkohtana on todettava, että jaksottaisella ilmastuksella ei saavuteta täydellistä nitrifikaatiota eikä typen poistoa.

2.2 Matemaattinen tarkastelu

Prosessin karkea matemaattinen tarkastelu voidaan tehdä seuraavien olettamusten pohjalta:

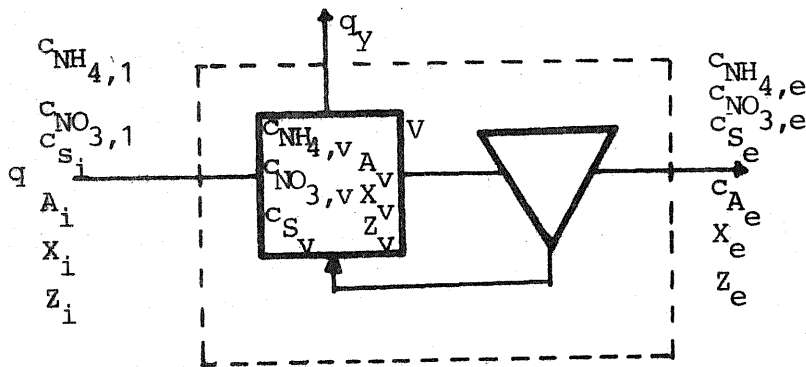
- aerobivaiheen aikana tapahtuu nitrifikaatio, aerobinen

BOD:n poisto sekä nitrifikaatiosta johtuva alkaliteetin lasku

- taukoaikana tapahtuu denitrifikaatio, denitrifikaatiosta johtuva alkaliteetin lisäys sekä nitraattirespiraatiosta johtuva BOD:n poistuminen.

Aerobivaiheen aikana nitrifioivat bakteerit lisääntyvät samoin kuin heterotrofiset bakteerit ja anaerobivaiheen aikana ainoastaan heterotrofiset bakteerit.

Olettamalla, että selkeyttämön tilavuus on reaktoritilavuuteen nähden vähäinen sekä kierrätys suuri, voidaan kaikkien reaktioiden olettaa tapahtuvan pelkästään ilmastusaltaassa. Johtamalla kullekin aineelle ainetaseet erikseen saadaan seuraavat yhtälöt (kuva 1).



Kuva 1. Ainevirrat.

Fig. 1. Mass flow.

Aerobivaihe

$$q \cdot c_{\text{NH}_4,i} + \bar{k}_n \cdot V = q \cdot c_{\text{NH}_4,e} + \frac{dc_{\text{NH}_4,v}}{dt} \cdot V \quad (1)$$

$$q \cdot c_{\text{NO}_3,i} + \bar{k}'_n \cdot V = q \cdot c_{\text{NO}_3,e} + \frac{dc_{\text{NO}_3,v}}{dt} \cdot V \quad (2)$$

$$q \cdot c_{S,i} + \bar{k}_b \cdot V = q \cdot c_{S,e} + \frac{dc_{S,v}}{dt} \cdot V \quad (3)$$

$$q \cdot X_i + \bar{k}_n^* \cdot V = (q - q_y) X_e + q_y X_v + \frac{dX_v}{dt} \cdot V \quad (4)$$

$$q \cdot Z_i + \bar{k}_b^* \cdot V = (q - q_y) Z_e + q_y Z_v + \frac{dZ_v}{dt} \cdot V \quad (5)$$

$$q \cdot A_i + k_a \cdot V = q \cdot A_e + \frac{dA_v}{dt} \cdot V \quad (6)$$

Anaerobivaihe

$$q \cdot c_{\text{NH}_4, i} + \bar{k}_{2n} \cdot V = q \cdot c_{\text{NH}_4, e} + \frac{dc_{\text{NH}_4, v}}{dt} \cdot V \quad (7)$$

$$q \cdot c_{\text{NO}_3, i} + \bar{k}_d \cdot V = q \cdot c_{\text{NO}_3, e} + \frac{dc_{\text{NO}_3}}{dt} \cdot V \quad (8)$$

$$q \cdot c_{s, i} + \bar{k}_{2b} \cdot V = q \cdot c_{s, e} + \frac{dc_{s, v}}{dt} \cdot V \quad (9)$$

$$q \cdot X_i = (q - q_y) \cdot X_e + q_y \cdot x_v + \frac{dX_v}{dt} \cdot V \quad (10)$$

$$q \cdot Z_i + \bar{k}_{2b}^* \cdot V = (q - q_y) Z_e + q_y Z_v + \frac{dZ_v}{dt} \cdot V \quad (11)$$

$$q \cdot A_i + \bar{k}_{2a} \cdot V = q A_e + \frac{dA_v}{dt} \cdot V \quad (12)$$

missä

q	on virtaama
c_{NH_4}	on ammoniumtypen pitoisuus
c_{NO_3}	on nitraattityypen pitoisuus
c_s	on orgaanisten yhdisteiden pitoisuus
X	on nitrifikaatiobakteerien pitoisuus
Z	on heterotrofisten bakteerien pitoisuus
A	on alkaliteetti
\bar{k}_n	on ammoniakin hapetusnopeus
\bar{k}'_n	on nitraatin muodostumisnopeus
\bar{k}_b	on orgaanisten yhdisteiden hapettumisnopeus aerobisissa oloissa
\bar{k}_a	on alkaliteetin muutosnopeus aerobisissa oloissa
\bar{k}_{2n}	on ammoniakin reaktionopeus anaerobisissa oloissa
\bar{k}_d	on denitrifikaationopeus
\bar{k}_n^*	on nitrifioivien bakteerien kasvunopeus
\bar{k}_b^*	on heterotrofisten bakteerien kasvunopeus aerobisissa oloissa

\bar{k}_{2b} on orgaanisten yhdisteiden hapettumisnopeus nitraatti-respiraatioissa

\bar{k}_{2b}^* on heterotrofisten bakteerien kasvu nitraattirespiraation aikana

\bar{k}_{2a} on alkaliteetin muutosnopeus denitrifikaation aikana

Alaindeksi i viittaa tulevaan jäteveteen
 e " lähtevään "
 v " reaktorin "

Tehdään seuraavat oletukset ja yksinkertaistukset

1. Tulevan jäteveden nitraattipitoisuus $c_{NO_3, i} = 0$
2. Ammoniakin hapetusnopeus on yhtä suuri kuin nitraatin syntymisnopeus aerobivaiheessa
 $-k_n = k_n'$
3. $q_y \ll q$
4. $k_{2n}' = 0$
5. Nitrifikaation ja heterotrofisten bakteerien kasvu noudattaa Monidin mallia

$$k_n^* = \mu_n \cdot \frac{c_{NH_4, v}}{c_{NH_4, v} + K_{S, NH_4}} \cdot X_v - b_n X_v \quad (13)$$

$$k_n = k_n^* / Y_n \quad (14)$$

$$k_b^* = \mu_s \cdot \frac{c_{S, v}}{c_{S, v} + K_{SS}} \cdot Z_v - b_b Z_v \quad (15)$$

$$k_b = k_b^* / Y_b \quad (16)$$

missä

μ_n on nitrifioivien bakteerien keskimääräinen kasvu-nopeusvakio

K_{S, NH_4} on Michaelin vakio ammoniumionille

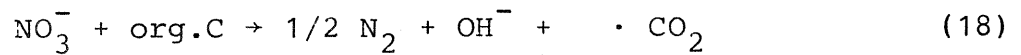
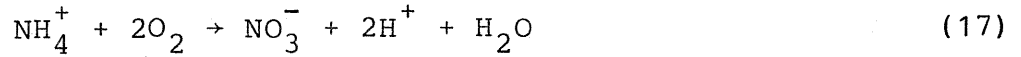
Y_n on nitrifikaatiobakteerien saanto

μ_b on heterotrofisten bakteerien keskimääräinen kasvunopeusvakio

K_{SS} on Michaelin vakio orgaanisille yhdisteille

Y_b on heterotrofisten bakteerien saanto

6. Alkaliteetin muutos johtuu pelkästään nitrifikaatiosta ja denitrifikaatiosta ja voidaan johtaa reaktioyhtälöistä 17 ja 18:



$$\text{jolloin } k_a = 0.14 \cdot k_n \quad (19)$$

$$k_{2a} = 0.07 \cdot k_d \quad (20)$$

7. Olettaen, että selkeyttämö toimii vain lietteen erottimena voidaan kirjoittaa

$$c_{\text{NH}_4,v} = c_{\text{NH}_4,e}$$

$$c_{\text{NO}_3,v} = c_{\text{NO}_3,e}$$

$$c_{S,v} = c_{S,e}$$

$$A_v = A_e$$

Sijoittamalla ja siirtämällä termit saadaan yhtälöt (1) - (12) seuraaviksi:

Aerobivaihe

$$\frac{dc_{\text{NH}_4,e}}{dt} = - \frac{\mu_n}{Y_n} \cdot \frac{c_{\text{NH}_4,e}}{c_{\text{NH}_4,e} + K_{S,\text{NH}_4}} X_v + \frac{q}{V} (c_{\text{NH}_4,i} - c_{\text{NH}_4,e}) \quad (21)$$

$$\frac{dc_{\text{NO}_3,e}}{dt} = \frac{\mu_n}{Y_n} \cdot \frac{c_{\text{NH}_4,e}}{c_{\text{NH}_4,e} + K_{S,\text{NH}_4}} \cdot X_v + \frac{q}{V} (c_{\text{NO}_3,i} - c_{\text{NO}_3,e}) \quad (22)$$

$$\frac{dc_S}{dt} = - \frac{\mu_b}{Y_b} \cdot \frac{c_{S,e}}{c_{S,e} + K_{SS}} \cdot Z_v + \frac{q}{V} (c_{S,i} - c_{S,e}) \quad (23)$$

$$\frac{dX_v}{dt} = \mu \left(\frac{c_{\text{NH}_4,e}}{c_{\text{NH}_4,e} + K_{S,\text{NH}_4}} - b_n \right) X_v + \frac{q}{V} (X_i - X_e) - \frac{q Y}{V} \cdot X_v \quad (24)$$

$$\frac{dz_v}{dt} = \mu_b \left(\frac{C_{S,e}}{C_{S,e} + K_{SS}} - b_b \right) Z_v + \frac{q}{V} (Z_i - Z_e) - \frac{q_y}{V} \cdot Z_v \quad (25)$$

$$\frac{dA_v}{dt} = -0.14 \cdot \frac{\mu_n}{Y_n} \cdot \frac{C_{NH_4,e}}{C_{NH_4,e} + K_{S,NH_4}} \cdot X_v + \frac{q}{V} (A_i - A_e) \quad (26)$$

Anaerobivaihe

$$\frac{dC_{NH_4,e}}{dt} = \frac{q}{V} (C_{NH_4,i} - C_{NH_4,e}) \quad (27)$$

$$\frac{dC_{NO_3,e}}{dt} = -k_d \cdot Z_v + \frac{q}{V} (C_{NO_3,i} - C_{NO_3,e}) \quad (28)$$

$$\frac{dC_S}{dt} = -Y_{bn} \cdot k_d \cdot Z_v + \frac{q}{V} (C_{S,i} - C_{S,e}) \quad (29)$$

$$\frac{dX_v}{dt} = \frac{q}{V} (X_i - X_e) - \frac{q_y}{V} X_v \quad (30)$$

$$\frac{dz_v}{dt} = Y_{bd} \cdot Y_{bn} \cdot k_d \cdot Z_v + \frac{q}{V} (Z_i - Z_e) - \frac{q_y}{V} Z_v \quad (31)$$

$$\frac{dA_e}{dt} = 0.07 \cdot k_d Z_v + \frac{q}{V} (A_i - A_e) \quad (32)$$

Jaksottaisessa ilmastuksessa ei stationääritilaa ole saavutettavissa jolloin derivaattatermiä ei voi merkitä nolllaksi. Yhtälöiden ratkaisuksi on käytettävä numeerisia integrointimenetelmiä.

Karkea arvio prosessin ajotavasta voidaan tehdä seuraavasti: Prosessia voidaan käsitellä kuten kaksiallasprosessia siten, että aerobijakso on verrannollinen aerobialtaan tilavuuteen ja anaerobijakso anaerobialtaan tilavuuteen. Silloin systeemin lieteikä saadaan yhtälöstä (33)

$$G = G_n \cdot \frac{t_a + t_o}{t_a} \quad (33)$$

missä

G on systeemin lieteikä
 G_n on nitrifikaation vaatima lieteikä
 t_a on aerobivaiheen pituus
 t_o on anaerobivaiheen pituus

G_n voidaan laskea tai arvioida tavanomaisen nitrifioivan aktiivilietelaitoksen lieteiän laskentatavan mukaisesti:

$$G_n = \frac{k_f}{0,18 \cdot e^{0,12(T-15)}} \quad (34)$$

missä

k_f on tulevan jäteveden ammoniumtyypen maksimipitoisuuden ja keskimääräisen pitoisuuden suhde
 T on lämpötila, +1-+20°C

t_a ja t_o on määriteltävä kokeellisesti välillä 0,5-2 h.

3. TUTKIMUKSEN MENETELMÄT

Tutkimus tehtiin Espoon Suomenojan puhdistamon alueella sijaitsevalla VTT:n omistamalla tutkimusasemalla 27.2.1979-31.12.1980.

3.1 Laitteisto

Tutkimus tehtiin kahdella rinnakkaisella pienoispuhdistamolla, joiden nimellinen maksimivirtaama oli 0,5 m³/h. Reaktioaltaat olivat teräsrakenteisia, epoksinnoitettuja sylinterinmuotoisia altaita. Selkeyttimet olivat poikkipinnaltaan pyöreitä, Dortmund-selkeyttäjäitä ja varustettu säädettävillä ylivuotokouruilla. Tutkimuksessa käytettiin kahta erikokoista reaktoriallasta joista toisten tilavuus oli 1,3 m³ ja toisten 3,0 m³. Reaktorialtaissa oli Nokian HKP 600 putkiilmastimet. Paineilma saatiin tutkimusaseman omasta paineilmaverkosta. Ilmastimet oli kytketty kellolaitteella ohjattavien magneettiventtiilien välityksellä verkostoon. Reaktorialtaissa oli lisäksi 250 W pystyhämmennimet, joiden kierosnopeutta voitiin säätää.

Prosessi- ja palautuslietepumppuina käytettiin Seepex epäkeskoruuvipumppuja, joiden kapasiteetit olivat 50-500 l/h. Pumppuja säädettiin hihnavariaattoreilla. Kemikaalipumppuna oli MPL:n mäntäpumppu, jonka tuotto oli 0-5,25 l/h. Putkiyhteenä käytettiin PVC- ja PE-muoviputkia. Ilmastusaltaissa oli Ulmaelektron PHT 100 pH-lähettimet ja RXT 100 redoxpotentiaalilähettimet antureina Leeds & Northrup'n valmistamat anturiyksiköt. Lisäksi mitattiin liuennut happi Ulmaelektron DOT 200 happimittareilla, joiden antureina olivat Delta Scientificin valmistamat yksiköt. Lämpötila mitattiin

Honeywellin PT 200 vastusanturilla. Kaikki mittausviestit rekisteröitiin Honeywellin Versaprint monipistepiirtureilla.

Näytteenottimet olivat aikakellolla ohjattuja Ulmaelektron UFA 110 ja UFA 120 kokoomanäytteenottimia.

Jätevesi otettiin Suomenojan jätevesipuhdistamon välppäämön jälkeen keskipakoruuvipumpulla tutkimusaseman jakoaltaaseen, josta se siivilöinnin jälkeen pumpattiin prosessiin.

3.2 Näytteenotto ja määritykset

Käsittelemättömästä ja käsitellystä jätevedestä kerättiin 24 h:n kokoomanäytteet 0,5 tunnin välein otetuista osanäytteistä. Näytteenottojakso aloitettiin aamulla kello 8.00. Viikonloppua edusti sunnuntaiaamulla aloitettu näytteenotto. Perjantaina ei otettu kokoomanäytettä. Ilmastusaltaasta ja palautuslietteestä otettiin kertanäytteet ennen ylijäämälietteen poistoa. Määritykset on esitetty taulukossa 1. Laboratoriomääritykset noudattivat vesihallituksen käyttämiä menetelmiä seuraavin poikkeuksin: Kokonaistyyppi tehtiin Kjeldalpolttona devardalisäyksellä ja tislaamalla ja titraamalla syntynyt ammoniakki (vesianalyysitoimikunnan mietintö 1968). Analyysissä käytettiin Tecator poltto- ja tislauslaitteistoa. Nitraatti määritettiin Orion Research ionispesifisellä nitraattielektrodilla 93-07, vertailuelektrodina oli Orion 90-02 kaksoissiltaelektrodi. Määritysmenetelmänä käytettiin tunnetun lisäyksen menetelmää. Ammoniumtyppi määritettiin Orion Research ionispesifisellä ammoniumelektrodilla 95-10 tunnetun lisäyksen menetelmällä. Mittarina käytettiin Orionin 701 A digitaalimittaria. Lietteiden kiintoaine ja sen hehkutushäviö määritettiin käyttämällä tuhkatonta suodatinpaperia.

Määrityksiä tehtiin vesihallituksen tutkimuslaboratoriossa Kyläsaarella sekä tutkimusasemalla.

3.3 Tutkimuksen aikataulu ja työrutiini

Prosessit käynnistettiin tammikuun alussa 1979 kasvattamalla liete ilman ympäriä noin 1,5 kk ajan kunnes saavutettiin täydellinen₃ nitrifikaatio. Reaktioaltaiden tilavuus vuonna 1979 oli 1,3 m³. Ensimmäisen vuoden aikana linjaa 1 ajettiin rinnakkaissaosteisena ja linjaa 2 ilman saostuskemikaalia. Vuonna 1980 käytettiin reaktoreina 3 m³ altaita ja kumpaankin linjaan syötettiin ferrosulfaattia. Ferrosulfaatti syötettiin 1 % liuoksena johon oli lisätty noin 0,5 litraa ns. akkuhappoa eli 30 % rikkihappoa liuoskuutiometriä kohti. Liuos syötettiin tulevan jäteveden joukkoon sekoittumisen varmistamiseksi.

Säädettävänä parametreina olivat:

- rauta-annostus
- virtaama
- jaksotus
- ylijäämälietteen poisto.

Taulukko 1 . Määritykset ja mittaukset.
Table 1 . Analyses and measurements.

	Käsittelimätön <i>Influent</i>	Käsitelty <i>Effluent</i>	Ilmastusallas <i>Aeration basin</i>
BOD ₇	X	X	
COD	X	X	
liuk. COD <i>sol. COD</i>	(X)	(X)	
kok.P <i>tot. P</i>	X	X	(Z)
liuk.P <i>sol. P</i>		X	Z
kok.N <i>tot. N</i>	X	X	
NH ₄ -N	X	X	Z
NO ₃ -N	(X)	X	Z
NO ₂ -N		(X)	(Z)
kok.Fe <i>tot. Fe</i>		X	(Z)
liuk.Fe <i>sol. Fe</i>		X	
Kiintoaine <i>Susp. solids</i>	X	X	Z
Kiintoaineen hehk.häviö <i>Volatile susp. solids</i>			Z
pH	X	X	m
Alkaliteetti <i>Alcalinity</i>		X	
Sähkönjohtokyky <i>Conductivity</i>	X	X	
0,5 h laskeuma <i>0,5 h settling</i>			Z
redokspotentiaali <i>redoxpotential</i>			m
lämpötila <i>temperature</i>	m		m
Liuenut happi <i>Dissolved oxygen</i>			m
X	kokoomanäyte	<i>composite sample</i>	
Z	kertanäyte	<i>grab sample</i>	
m	piirturi	<i>recorder</i>	
()	ajoittain	<i>occasionally</i>	

Työrutiini oli seuraava:

- näytteet kerättiin päivittäin kello 7.30-8.00 ja analysoitiin samana päivänä
 - ylijäämäliete poistettiin näytteenoton jälkeen. Lietettä otettiin vakiotilavuus suoraan reaktorialtaasta.
 - pumppujen tuotto tarkistettiin ja säädettiin päivittäin
 - mittarit puhdistettiin ja kalibroitiin 1-2 viikon välein sekä häiriötilanteiden aikana
 - happipitoisuus ilmastusaltaassa säädettiin välille 2-4 mg/l päivittäin aerobivaiheen aikana
 - piirturit luettiin päivittäin ja lukemaksi otettiin silmämääräisesti arvioitu keskiarvo edelliseltä vuorokaudelta pH:n ja lämpötilan osalta.
- Happipitoisuudeksi otettiin aerobivaiheen keskimääräinen maksimihappipitoisuus.

3.4 Tulosten käsittely

Biologisia prosesseja koskevista tutkimuksista, jotka tehdään luonnollisilla jätevesillä ei tulosten käsittelyä voida tehdä olettaen, että systeemi olisi saavuttanut tasapainotilan. Tämä johtuu tulevan jäteveden vaihteluista sekä pitoisuuksien että lämpötilan suhteen. Jätevesien sisältämät toksiset yhdisteet saattavat lisäksi aiheuttaa eripituisia prosessihäiriöitä. Liuottimet ja muut liuoksessa pysyvät yhdisteet saattavat aiheuttaa akuuttia toksisuutta, jonka vaikutus saattaa olla voimakas mutta jäädä lyhytaikaiseksi. Öljyt, mineraalit, rasvat, raskasmetallit ja muut biologiseen lietteeseen sitoutuvat myrkyt taas saattavat aiheuttaa hyvin pitkäaikaisia häiriöitä. Tässä tutkimuksessa ei tasapainotilan tarkastelua voida suorittaa myöskään senvuoksi, että tutkimusjaksot jäivät verrattain lyhyiksi.

Kun tarkastellaan puhdistamoiden hydrauliikkaa voidaan olettaa, että vesifaasin hydraulinen tasapaino saavutetaan noin nelinkertaisen reaktoreiden yhteisviipymääjan kuluttua. Tässä tapauksessa tasapainotila oltaisiin saavutettu noin 2-3 d kuluttua eli kun systeemissä tehtiin muutos perjantaina, niin systeemi saavutti tasapainotilan viikonlopun aikana. Kun tarkastellaan systeemiä lietteen kannalta, olisi tasapainotilan saavuttamiseksi vaadittu useassa tapauksessa 2, jopa 4 kk:n stabiloitusmisaika. Tämä johtuu siitä, että lieteikä oli yli 20 vrk mikä on sama kuin lietteen hydraulinen viipymä prosessissa. Aktiiviliettemikrobien adaptaatio saattaa olla kuitenkin tätä nopeampi ja liete on saattanut saavuttaa tasapainotilan lyhyemmässä ajassa. Kun tilannetta tarkastellaan lietteen epäorgaanisen fraktion, esimerkiksi raudan kannalta voidaan todeta, että raudan suhteen tasapainotila todella saavutetaan vasta useamman kuukauden jälkeen. Tasapainotilan tarkastelun käyttöä tässä tapauksessa vaikeuttaa myös se, että jaksottainen ilmastus merkitsee prosessin jatkuvaa dynaamista muutostilaa. Prosessin dynaaminen käsittely olisi edellyttänyt ainakin ammoniumtypen, nitraattitypen, orgaanisen hiilen sekä fosforin jatkuvaa analysointia joko automaattisilla analysaattoreilla tai suorittamalla erittäin tiheä näytteenotto. Tähän ei kuitenkaan tämän tutkimuksen puitteissa ollut mahdollisuutta. Tulokset onkin käsitelty pelkästään tilastollisesti käyttäen valmiita tilastomatemaattisia ohjelmapaketteja. Pääasiallisesti käytettiin Kalifornian yliopiston BMDP-ohjelmistoa, joka on installoitu vesihallituksen PDP-tietokoneelle.

Koko tutkimuksen kesto oli yhteensä 690 vrk, jonka aikana oli yhteensä 275 havaintopäivää. Koko tutkimusaika jakaantuu linjan 1 osalta 20 havaintojaksoon ja linjan 2 osalta 18 havaintojaksoon. Tulosten käsittelyyn on otettu yhteensä noin 270 havaintopäivää, ja käsittelyä varten on suodatettu pois liian suuret tai liian pienet tai muuten epäloogiset analyysiarvot. Tulosten käsittelyssä on analyysitulokset jaettu aikaluokkiin sekä fosforinpoiston käsittelyssä myös rauta-fosfori moolisuhteiluokkiin. Riippuvuuksien selvittämiseksi on käytetty regressioanalyysiä sekä koko alkuperäisaineistolle, että luokitellulle aineistolle jolloin painokertoimena on käytetty havaintopäivien lukumäärää luokassa.

4. TULOKSET JA NIIDEN TARKASTELU

4.1 Tulevan jäteveden laatu

Käsiteltävän jäteveden laatu eri tutkimusjaksoilla on esitetty taulukossa 2. Jätevesi oli etupäässä asutusjätevettä, jossa teollisuusjätevesien osuus oli noin 10 % kuivan ajan virtaamasta. Tärkeimmät teollisuuslaitokset ovat lääketehdas, Kemiran tutkimuslaboratorio, teknokemiallinen tehdas, akkutehdas ja asetyleenitehdas. Lisäksi verkostoon on liittynyt joukko pieniä galvanointilaitoksia ja metallinkäsittelylaitoksia. Jäteveden laatuun vaikuttivat satunnaiset pH-heilahdukset, liuotinryöpyt sekä muut äkilliset teollisuuspäästöt. BOD-määritysten perusteella jätevesi sisälsi ajoittain erittäin toksisia yhdisteitä jotka usein häiritsivät voimakkaasti biologista toimintaa puhdistamoissa. Lisäksi sulamis- ja sadekausina jätevesi laimeni pitoisuuksiltaan jopa kolmasosaan kuivan ajan pitoisuuksiin verrattuna. Lämpötila pysyi jatkuvasti kuitenkin yli +8°C.

Taulukko 2 . Käsiteltävän jäteveden laatu eri tutkimusjaksoilla (keskiarvo \bar{x} ja hajonta s).
Table 2 Influent concentrations at different periods (mean \bar{x} and deviation s).

Jakso period	pH		Alkali- teetti mmol/l Alkalinity mmol/l		Johto- kyky, μ S Conduc- tivity, μ S		Kiinto- aine, mg/l Susp. solids, mg/l		BOD ₇ , mg/l		COD, mg/l		kok N, mg/l tot N, mg/l		NH ₄ -N, mg/l		kok P, mg/l tot P, mg/l	
	\bar{x}	s	\bar{x}	s	\bar{x}	s	\bar{x}	s	\bar{x}	s	\bar{x}	s	\bar{x}	s	\bar{x}	s	\bar{x}	s
1	1,34	0,15	4,61	0,66	619	48	144	55	153	35	293	80	38,4	6,6	31,4	4,3	6,46	1,40
2	7,33	0,23	3,99	0,85	619	27	170	49	210	98	297	98	38,2	3,0	22,4	10,1	5,79	2,21
3	7,05	0,30	4,27	1,26	521	119	176	55	107	55	199	73	26,6	12,3	18,4	8,3	4,03	1,30
4	6,98	0,10	3,65	0,52	410	18	137	59	98	52	164	62	22,7	3,4	15,9	4,6	4,41	1,13
5	7,18	0,24	4,60	0,60	617	63	159	48	145	19	247	83	34,9	-	26,1	3,3	5,56	2,30
6	7,25	0,06	4,88	0,53	615	37	168	56	138	52	350	49	-	-	27,0	1,4	3,37	-
7	7,09	0,13	4,92	0,41	642	39	239	79	167	50	290	87	-	-	27,9	5,6	5,69	2,25
8	7,07	0,06	5,27	0,38	613	53	220	43	112	35	267	68	37,7	4,0	28,1	4,0	5,40	1,70
9	7,13	0,17	5,11	0,54	636	83	233	56	187	38	294	62	40,6	3,3	32,0	5,8	6,06	2,01
10	7,21	0,49	5,16	0,90	621	68	172	93	140	47	286	110	40,1	7,9	31,3	5,8	7,68	2,10
11	6,80	0,27	3,98	0,56	514	58	87	50	88	23	145	30	24,6	5,8	16,2	9,5	5,12	1,27
12	6,98	0,28	4,63	0,69	540	73	165	75	111	38	249	112	27,1	9,1	18,1	10,1	6,02	1,73
13	6,90	0,35	5,20	0,83	681	80	277	53	186	30	222	88	48,1	1,3	31,9	8,9	8,99	1,97
14	6,76	0,30	3,96	0,69	569	90	190	64	139	48	171	42	-	-	14,7	6,2	6,19	2,89
15	6,95	0,26	4,44	0,52	641	86	215	70	133	29	206	65	8,1	-	17,5	8,2	8,02	6,73
16	7,08	0,20	5,28	0,87	726	84	267	78	202	55	349	92	-	-	27,2	9,9	9,44	2,13
17	7,50	0,66	4,14	1,20	739	92	221	78	156	27	208	60	29,5	9,8	28,9	11,0	7,08	1,80
18	7,44	0,15	4,16	0,68	-	-	211	74	103	28	174	47	23,3	9,5	23,2	7,5	4,63	1,56
19	7,27	0,11	4,06	0,64	-	-	178	55	94	38	160	35	26,2	10,5	21,8	6,2	4,47	1,60
20	7,25	0,13	3,79	0,60	-	-	160	67	102	29	162	41	25,7	7,5	18,8	6,9	4,91	1,35

4.2 Ajoparametrit

Yksiköiden ajoparametrit on esitetty kuvissa 2 ja 3 ja taulukoissa 3 ja 4.

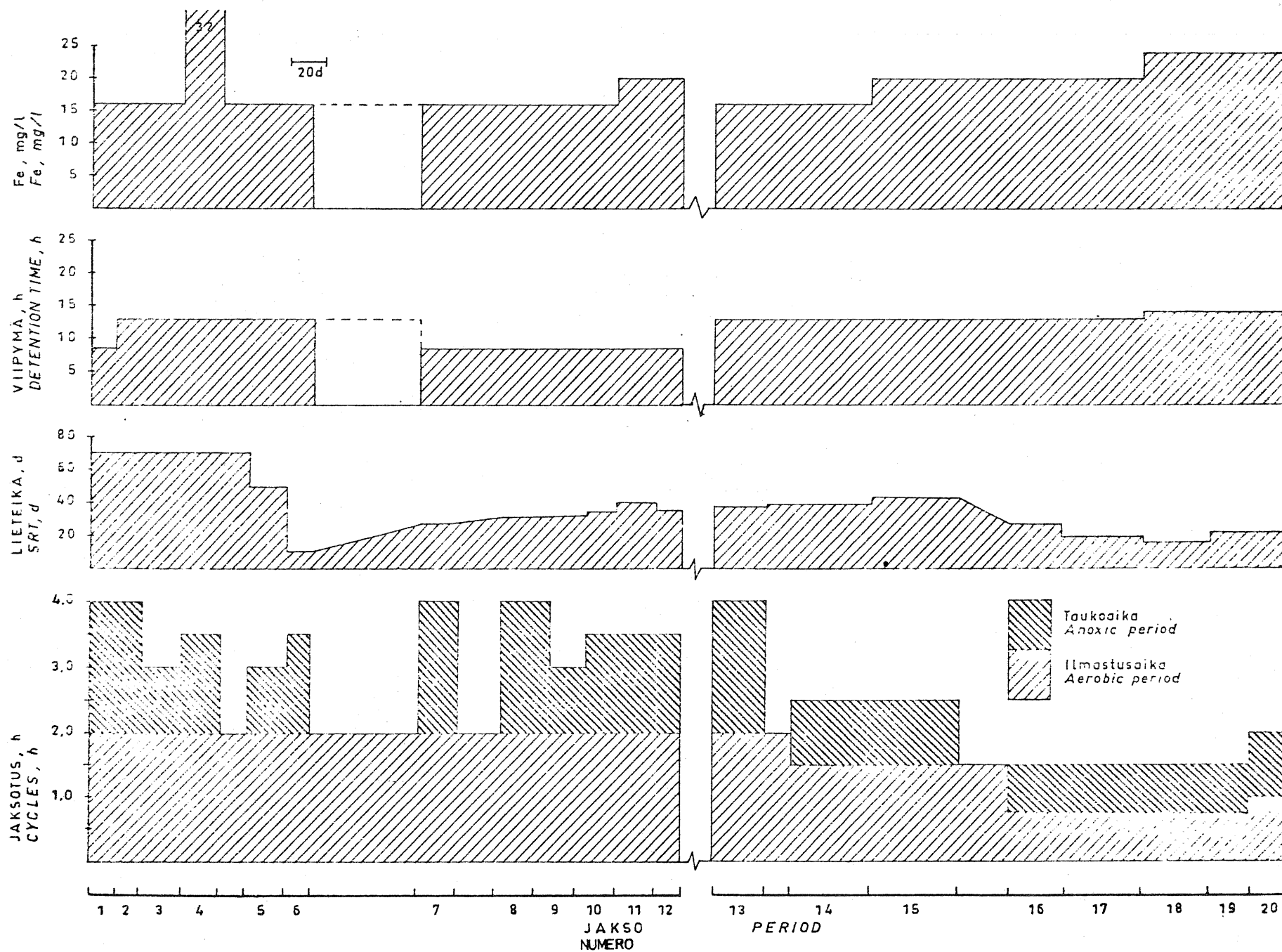
Lietekuormitus laskettiin lietteen hehkutushäviötä kohti riippumatta jaksotuksen pituudesta. Lietekuormitus vaihteli kummallakin linjalla välillä 0,03-0,1 kg/kg·d. Lietteikää pyrittiin pitämään yhtälön 33 mukaisesti yli 15 d. Todellinen lietteikä, jossa otetaan huomioon myös karkaava kiinto-aines sekä viikonloppujen aiheuttama tauko lietteenpoistossa, laskettiin yhtälöstä 35.

Taulukko 3 . Prosessiparametrit eri tutkimusjaksoilla linjalla 1.
Table 3 . Process parameters during different periods in unit 1.

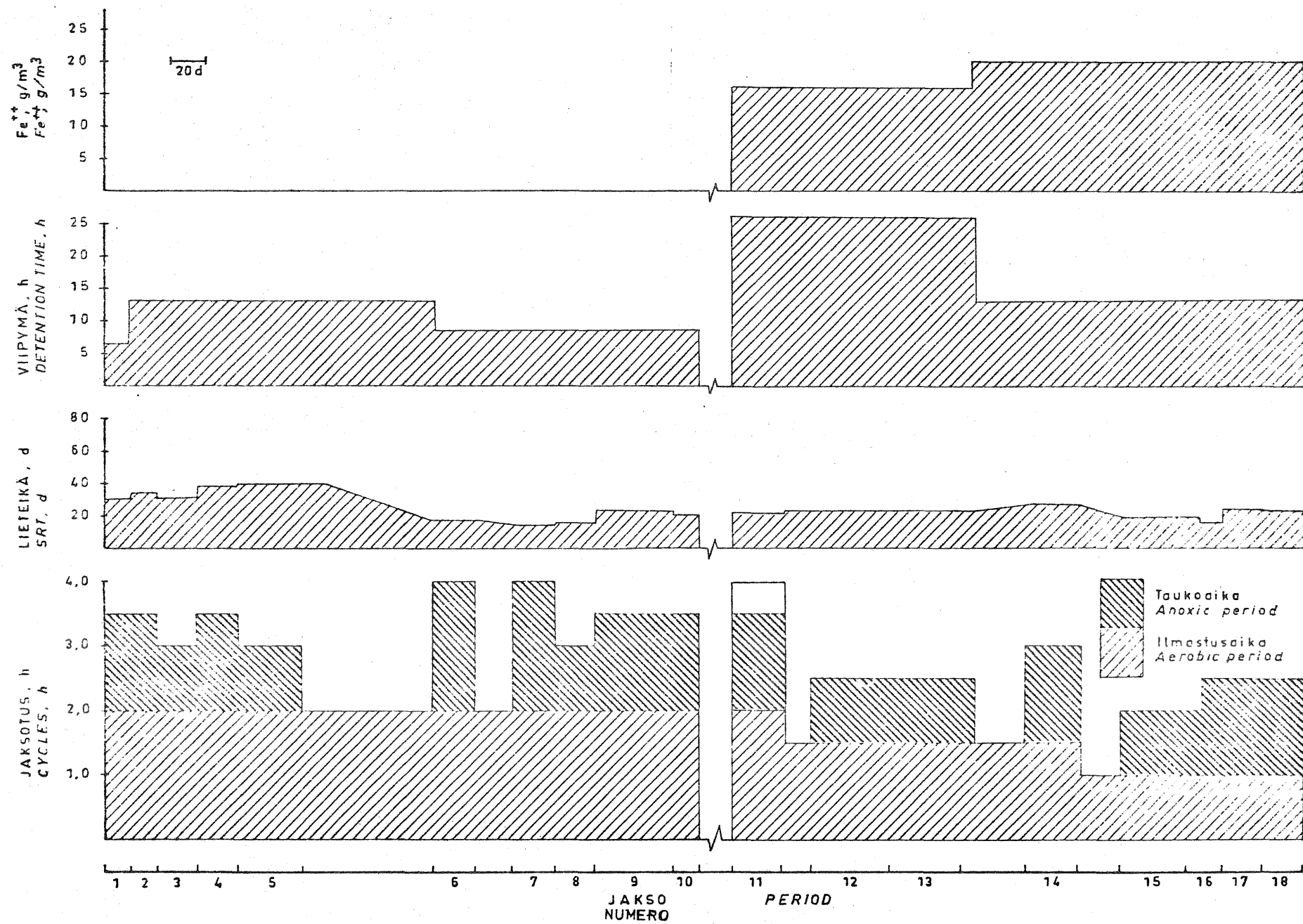
Jakso Period	Lieteikä,d Sludge age,d	Lietekuorma kg/kg·d (BOD/MLVSS) Sludge load	Viipymä,h Retention,h	Ilmastusaika,h Aerobic time,h	Tauko aika,h Anoxic time,h	Raudan syöttö g/m ³ Fe ⁺⁺ ferrous feed	Lämpötila,°C Temperature,°C	Jakson pituus,d Duration,d
1	(79)	0,075	8,7	2,00	2,00	16	11,3	13
2	(109)	0,060	13,0	2,00	2,00	16	10,9	13
3	70	0,030	13,0	2,00	1,00	16	9,5	21
4	71	0,027	13,0	2,00	1,50	32	8,6	21
5	49	0,032	13,0	2,00	1,00	16	14,1	18
6	10	0,061	13,0	2,00	1,50	16	16,4	5
7	27	0,100	8,7	2,00	2,00	16	18,9	19
8	31	0,065	8,7	2,00	2,00	16	17,2	21
9	32	0,116	8,7	2,00	1,00	16	16,2	19
10	34	0,066	8,7	2,00	1,50	16	13,8	19
11	39	0,045	8,7	2,00	1,50	20	11,0	20
12	35	0,052	8,7	2,00	1,50	20	10,5	22
13	37	0,082	13,0	2,00	1,50	16	10,7	27
14	39	0,052-0,063	13,0	1,50	1,00	16	9,4-9,8	44
15	43	0,040-0,056	13,0	1,50	1,00	20	11,6-15,3	48
16	27	0,059	13,0	0,75	0,75	20	18,5	27
17	19	0,058	13,0	0,75	0,75	20	17,8	43
18	16	0,064	14,0	0,75	0,75	24	13,2	33
19	21	0,060	14,0	0,70	0,75	24	10,2	19
20	21	0,052	14,0	1,00	1,00	24	9,3	13

Taulukko 4 . Prosessiparametrit eri tutkimusjaksoilla linjalla 2.
Table 4 . Process parameters during different periods in unit 2.

Jakso Period	Lieteikä,d Sludge age,d	Lietekuorma kg/kg·d (BOD/MLVSS) Sludge load	Viipymä,h Retention,h	Ilmastusaika,h Aerobic time,h	Tauko aika,h Anoxic time,h	Raudan syöttö g/m ³ Fe ⁺⁺ Ferrous feed	Lämpötila,°C Temperature,°C	Jakson pituus,d Duration,d
1	30	0,091	6,5	2,0	2,0	0	12,2	13
2	34	0,085	13,0	2,0	2,0	0	14,5	13
3	31	0,193	13,0	2,0	1,0	0	12,5	21
4	38	0,043	13,0	2,0	1,5	0	10,3	26
5	39	0,027	13,0	2,0	1,0	0	15,3	34
6	17	0,111	8,7	2,0	2,0	0	20,3	19
7	15	0,088	8,7	2,0	2,0	0	17,7	21
8	16	0,134	8,7	2,0	1,0	0	15,8	19
9	23	0,066	8,7	2,0	1,5	0	12,9	39
10	20	0,066	8,7	2,0	1,5	0	11,7	21
11	22	0,038	26,0	2,0	1,5	16	11,1	28
12	24	0,035	26,0	1,5	1,0	16	9,6	17
13	23	0,035	26,0	1,5	1,0	16	13,0	48
14	27	0,065	13,0	1,5	1,5	20	18,5	28
15	19	0,055	13,0	1,0	1,0	20	15,7	44
16	16	0,043	13,0	1,0	1,5	20	13,0	11
17	24	0,044	13,0	1,0	1,5	20	10,6	19
18	23	0,051	13,0	1,0	1,5	20	10,2	18



Kuva 2. Linjan 1 ajoparametrit.
Fig. 2. Operating parameters in unit 1.



Kuva 3. Linjan 2 ajoparametrit.
Fig. 3. Operating parameters in unit 2.

$$G = \frac{m \cdot V \cdot \text{MLSS}}{0,01 \sum_{i=1}^{\infty} (V \cdot \text{MLSS}) \cdot \Delta + 24 \cdot m \cdot q \cdot \overline{\text{SS}}_e} \quad (35)$$

missä

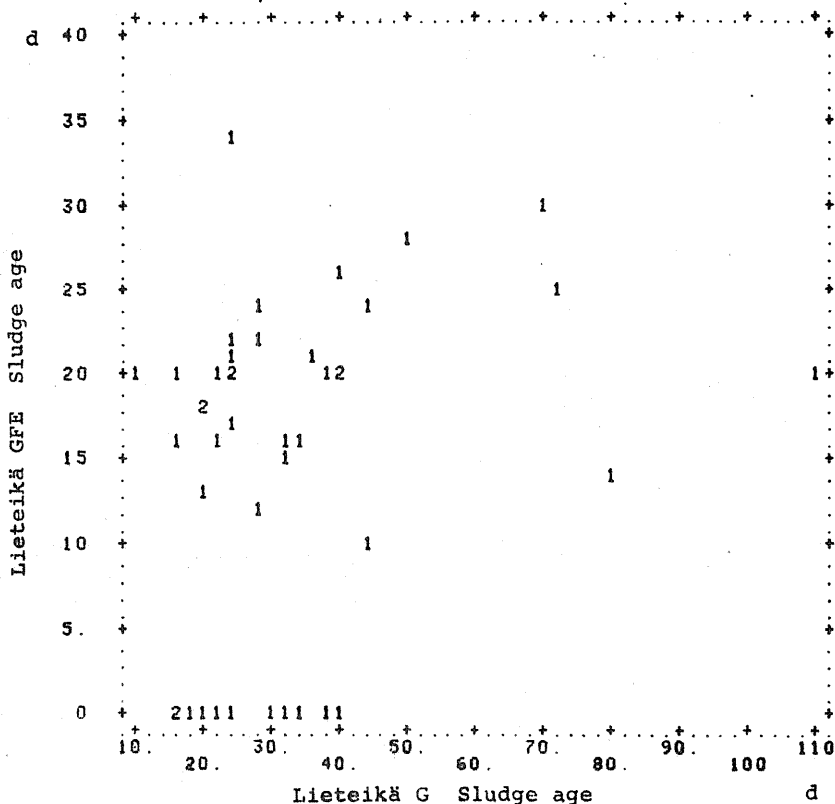
m on jakson pituus, d
 v on ylijäämälietteen poistokertojen lukumäärä
 Δ on ylijäämälietteen poisto, %
 $\overline{\text{SS}}$ on keskimääräinen lähtevän jäteveden kiinto-
 ainepitoisuus jakson aikana
 V on ilmastusaltaan tilavuus
 MLSS on ilmastusaltaan kiintoainepitoisuus
 q on virtaama.

Lieteiä laskettiin myös kiintoaineeseen sitoutuneen raudan perusteella yhtälöstä (36):

$$G_{\text{Fe}} = \frac{\text{MLSS} \cdot \text{FeSS}}{24 \cdot q \cdot (c_{\text{Fe},i} - c_{\text{Fe},e})} \quad (36)$$

missä

FeSS on lietteen rautapitoisuus
 $c_{\text{Fe},i}$ on tulevan jäteveden rautapitoisuus, mg/l
 $c_{\text{Fe},e}$ on lähtevän jäteveden rautapitoisuus, mg/l



Kuva 4. Raudan perusteella lasketun lieteiän GFE ja tavanomaisen lieteiän G välinen yhteys.

Fig. 4. Plot of GFE against G. GFE is sludge age calculated from the ferrous concentration of sludge and G is calculated from sludge wastage.

Jälkimmäisellä tavalla lasketut lieteiän arvot olivat pienemmät kuin yhtälöllä (34) lasketut arvot. Lietteen rautapitoisuusmäärittämisä tehtiin vain 1-2 kertaa viikossa mikä vähentää yhtälöllä (36) lasketun lieteiän tilastollista luotettavuutta, toisaalta taas lieteikään verrattuna lyhyet koejaksot voivat aiheuttaa vääristymiä yhtälöllä (35) saaduissa arvoissa. Kuvassa 4 on esitetty niiden jaksojen lasketut G ja G_{Fe} -arvot jolloin yksiköihin syötettiin rautaa.

Ferrosulfaatin annostus pyrittiin pitämään sellaisena, että se vastasi suomalaisilla rinnakkaissaostuslaitoksilla yleisesti käytettyä annostusta. Fe:P moolisuhde oli silloin 1,0...2,5 mol/mol.

Jälkiselkeyttämöiden hydraulinen kuormitus oli 0,13-0,38 m³/m². h ja lietepintakuorma 1,1-2,1 kg/m³.d joten selkeyttämöt olivat nykyisen käytännön mukaisesti ylimitoitettuja eivätkä muodostuneet prosessin rajoittaviksi tekijöiksi.

4.3 Typenpoisto

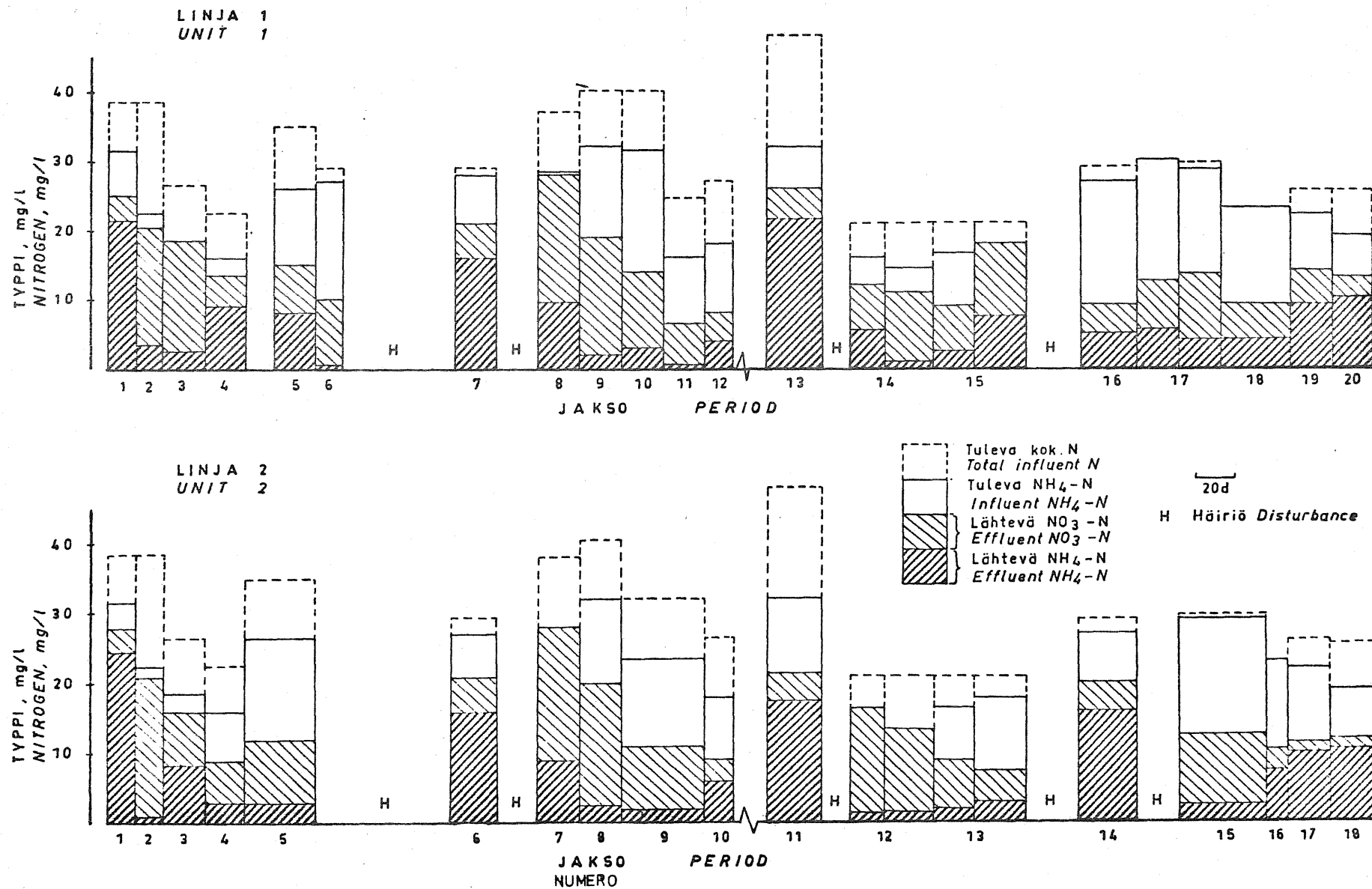
Kokonaistyyppireduktio laskettuna ammonium- ja nitraattityypipitoisuuksista oli 30-65 % ja parhaimmillaan n. 80 % laskettuna kokonaistypen pitoisuuksista. Nitrifikaatioaste oli yleensä yli 80 % kummallakin linjalla paitsi linjalla 1 jaksojen 1, 7, 13 ja 20 aikana ja linjalla 2 jaksojen 1, 6, 11, 14, 16, 17 ja 18 aikana. Denitrifikaatio rajoitti useimmiten tyyppireduktiota. Kuvissa 5 on esitetty typen komponentit eri jaksojen aikana ja taulukoissa 5 ja 6 käsitellyn jäteveden pitoisuudet.

Lineaarisen regressioanalyysin perusteella oli nitrifikaatioasteen riippuvuus pH-arvosta, lietekuormasta, rauta-annostuksesta ja anaerobivaiheen pituudesta seuraavaa:

	Regressio- kerroin	t-testi	Osuus selitys- asteesta
Leikkauspiste	2,42	3,49**	
pH	-0,17	-1,70 ^o	0,04
Lietekuorma	-0,13	-2,30*	0,08
Rauta-annostus	-0,0014	-2,25*	0,08
Anaerobivaiheen pituus	-0,0043	-3,89***	0,23

Mallin selitysteaste oli 0,41, Mallowin Cp-arvo 3,99 ja F-arvo 6.65. Malli ei ole erityisen hyvä, mutta voidaan todeta, että lietekuorman, rauta-annostuksen kasvu sekä anaerobivaiheen pituuden lisäys vaikuttivat negatiivisesti nitrifikaatioasteeseen.

Nitrifikaatioaste oli yleensä pienimmillään, kun anaerobivaiheen pituus oli 2.0 h. Aerobivaiheen ja anaerobivaiheen suhde oli yksi joten lieteiän olisi pitänyt periaatteessa vastata sitä tilannetta, kun jaksotus oli 0,5/0,5 tai 1,0/1,0 h.



Kuva 5. Tulevan ja lähtevän jäteveden typen komponentit eri tutkimusjaksoilla
 Fig. 5. Influent and effluent nitrogen components during different periods.

Taulukko 5. Käsitellyn jäteveden laatu eri tutkimusjaksoilla linjalla 1.
Table 5. Effluent concentrations at different periods in unit 1.

Jak- so Per- iod	pH		Alkali- teetti mmol/l Alkalinity mmol/l		Johto- kyky, μ S Conduc- tivity, μ S		Kiinto- aine, mg/l Susp. solids, mg/l		BOD ₇ , mg/l		COD, mg/l		kok N, mg/l		NH ₄ -N, mg/l		NO ₂ -N mg/l		kok.P, mg/l tot P, mg/l		liuk.P, mg/l soluble P, mg/l		kok.Fe, mg/l tot Fe, mg/l		liuk.Fe, mg/l soluble Fe, mg/l	
	\bar{x}	s	\bar{x}	s	\bar{x}	s	\bar{x}	s	\bar{x}	s	\bar{x}	s	\bar{x}	s	\bar{x}	s	\bar{x}	s	\bar{x}	s	\bar{x}	s	\bar{x}	s	\bar{x}	s
1	7.19	0.16	1.78	0.95	552	54	25,8	24,7	28	19	66	22	30	6	22,3	9,4	6,3	9,2	1,4	0,9	0,4	0,3	4,3	3,6	0,10	0,10
2	6,74	0,11	0,56	0,11	484	59	13,3	14,5	12	5	72	27	12	3	3,6	6,7	16,9	7,8	0,7	0,1	0,3	0,2	1,9	0,2	0,10	0,10
3	6,66	0,47	0,88	0,50	449	53	41,4	25,1	13	10	39	13	18	2	2,7	5,9	12,3	3,7	0,7	0,5	0,2	0,1	1,8	1,0	0,10	0,10
4	6,14	0,69	0,64	0,41	379	46	41,3	24,0	15	14	44	20	16	3	9,1	4,9	4,5	3,4	1,3	1,4	0,3	0,3	3,0	2,3	0,10	0,10
5	6,81	0,18	1,10	0,58	468	29	5,1	4,4	35	13	86	42	30	-	7,9	8,3	7,0	3,2	1,0	0,5	0,6	0,2	1,6	0,2	0,10	0,10
6	6,83	0,06	1,50	0,62	480	39	22,0	1,0	-	-	99	49	-	-	-	-	10,2	8,8	0,7	-	0,3	-	-	-	0,10	0,10
7	6,93	0,19	2,02	0,50	535	68	38,1	16,1	40	11	59	12	-	-	16,7	7,6	4,9	2,9	1,3	0,7	0,6	0,3	1,4	0,5	0,10	0,10
8	6,38	0,32	0,75	0,38	521	42	27,5	14,0	10	7	67	22	25	1	8,8	5,3	20,2	7,5	1,6	0,9	0,7	0,3	2,3	1,4	0,10	0,10
9	6,69	0,26	0,71	0,46	507	46	25,3	12,4	24	19	60	15	20	2	2,8	1,4	16,9	4,2	1,5	0,4	0,7	0,2	1,8	0,8	0,10	0,10
10	6,66	0,15	1,07	0,31	488	49	19,6	10,1	18	7	62	17	13	4	2,9	3,0	11,1	4,9	2,2	0,9	1,3	0,4	1,0	0,1	0,10	0,10
11	6,36	0,24	0,69	0,25	433	35	10,8	9,5	12	3	67	94	13	4	1,0	1,4	6,2	2,6	1,1	0,6	0,8	0,7	1,2	0,3	0,10	0,10
12	6,60	0,28	0,99	0,58	445	57	24,9	20,8	16	8	49	19	12	4	4,2	4,7	4,1	2,2	0,8	0,3	0,3	0,2	1,7	0,5	0,10	0,10
13	6,84	0,09	2,66	0,23	595	10	35,0	25,2	81	24	53	12	26	1	21,6	5,4	3,8	2,2	2,0	0,5	1,8	0,8	2,8	4,8	0,10	0,10
14	6,40	0,34	0,80	0,58	483	64	37,5	25,9	12	5	32	8	-	-	2,8	3,2	9,0	5,3	0,7	0,4	0,4	0,3	1,0	0,5	0,09	0,05
15	6,79	0,08	1,05	0,20	520	46	43,1	40,0	17	12	46	10	-	-	1,0	1,9	7,2	3,9	1,4	1,0	0,8	0,3	1,7	2,6	0,06	0,02
16	6,89	0,19	1,80	0,49	563	57	45,8	32,5	25	8	61	20	-	-	4,8	6,4	4,2	2,4	2,3	0,8	1,4	0,4	1,5	0,4	0,15	0,35
17	7,00	0,36	1,57	1,12	600	98	47,2	23,7	20	13	56	28	13	3	4,6	5,1	8,0	5,7	2,5	0,9	1,4	0,9	2,2	2,4	0,10	0,09
18	6,92	0,23	0,94	0,44	-	-	46,2	16,2	9	6	49	12	11	3	4,1	4,3	4,9	3,5	1,0	0,3	0,2	0,2	3,5	1,0	0,07	0,04
19	6,92	0,27	1,62	0,65	-	-	41,7	11,8	16	7	46	7	14	5	9,3	5,4	4,9	3,0	1,0	0,4	0,3	0,2	3,1	0,9	0,09	0,10
20	7,03	0,18	1,61	0,60	-	-	42,8	20,1	18	4	49	7	17	3	10,8	5,3	3,3	1,8	0,9	0,3	0,3	0,1	2,9	0,9	0,05	0,04

Taulukko 6. Käsitellyn jäteveden laatu eri tutkimusjaksoilla linjalla 2.
Table 6. Effluent concentrations at different periods in unit 2.

Jak- so Per- iod	pH		Alkali- teetti mmol/l Alcalinity mmol/l		Johto- kyky, μ S Conduc- tivity, μ S		Kiinto- aine, mg/l Susp. solids, mg/l		BOD ₇ , mg/l		COD, mg/l		kok N, mg/l		NH ₄ -N, mg/l		NO ₃ -N mg/l		kok.P, mg/l tot P, mg/l		liuk.P, mg/l soluble P, mg/l		kok.Fe, mg/l tot Fe, mg/l		liuk.Fe, mg/l soluble Fe, mg/l	
	\bar{x}	s	\bar{x}	s	\bar{x}	s	\bar{x}	s	\bar{x}	s	\bar{x}	s	\bar{x}	s	\bar{x}	s	\bar{x}	s	\bar{x}	s	\bar{x}	s	\bar{x}	s	\bar{x}	s
1	7,21	0,15	3,04	0,51	526	52	23,6	28,0	28	18	96	21	30	12	24,6	6,4	3,4	2,1	5,0	1,4	3,2	0,7				
2	6,90	0,17	1,13	0,64	511	12	-	-	-	-	-	-	-	-	0,9	1,6	20,1	20,5	10,0	-	3,6	1,3				
3	6,87	0,30	1,90	0,84	447	84	46,7	26,3	34	35	91	47	18	8	8,6	7,9	7,4	3,0	3,8	2,0	2,4	1,0				
4	6,62	0,16	1,31	0,29	337	61	35,1	21,6	25	30	62	34	13	6	3,1	3,8	5,9	2,1	2,6	0,9	1,8	0,8				
5	6,76	0,51	1,21	0,51	435	52	31,7	34,4	21	7	67	16	13	-	2,9	4,6	9,1	3,9	3,4	1,6	1,6	0,9				
6	6,96	0,19	2,66	0,43	539	56	47,3	32,0	78	23	102	98	-	-	16,3	5,0	5,1	0,8	4,8	3,0	2,2	1,0				
7	6,43	0,35	1,05	0,95	512	28	53,2	31,0	26	17	94	43	30	4	8,9	7,0	22,7	6,5	4,7	2,3	2,9	1,3				
8	6,67	0,21	0,93	0,38	493	33	54,2	57,8	31	21	65	16	22	4	2,5	6,2	17,5	6,1	4,6	1,7	2,9	0,7				
9	6,56	0,24	1,38	0,33	460	44	16,4	13,1	18	9	73	64	15	3	2,1	2,6	8,9	4,7	4,4	1,7	3,5	1,5				
10	6,63	0,23	1,95	0,93	460	84	23,8	19,4	15	4	57	9	14	6	6,0	5,9	3,2	2,2	4,1	1,0	2,9	1,1				
11	6,69	0,07	2,47	0,82	558	37	42,6	21,5	39	11	92	57	16	3	17,7	9,2	4,2	2,9	2,3	0,7	1,6	1,0	2,9	5,1		
12	6,41	0,32	0,85	0,75	474	60	44,7	14,9	20	9	46	17	-	-	1,6	2,4	13,2	4,8	1,8	0,8	0,8	0,4	1,7	1,4	0,09	
13	6,87	0,09	1,48	0,39	515	57	41,0	20,0	18	6	46	11	-	-	2,6	3,1	5,6	3,0	2,2	1,0	1,4	0,6	1,2	0,5	0,07	
14	6,88	0,23	2,32	0,89	639	53	45,6	20,9	31	9	67	19	-	-	15,9	9,4	3,9	1,8	1,8	0,8	0,7	0,3	2,5	1,2	0,12	
15	7,18	0,31	1,05	0,40	624	159	40,3	17,7	25	13	49	10	13	5	2,5	2,1	10,2	10,7	1,8	1,0	0,8	0,6	2,1	0,5	0,07	
16	7,07	0,20	1,59	0,46	-	-	42,9	7,9	22	8	48	6	12	6	7,6	6,1	3,7	3,3	1,1	0,3	0,5	0,2	2,4	0,4	0,13	
17	7,07	0,20	1,91	0,62	-	-	33,4	18,3	29	11	45	8	11	5	10,3	6,0	1,4	1,2	1,2	0,5	0,5	0,4	2,4	0,5	0,03	
18	7,11	0,17	1,92	0,54	-	-	41,2	20,2	25	7	47	9	13	5	10,7	5,9	1,5	0,7	1,0	0,3	0,4	0,3	1,6	0,5	0,08	

Nitrifikaationopeudet vaihtelivat välillä 0,11 ja 1,1 g/kg·h linjalla 1 ja välillä 0,2 ja 1,5 g/kg·h linjalla 2. Denitrifikaationopeudet vaihtelivat vastaavasti välillä 0,13 ja 0,78 g/kg·h ja 0,16 ja 1,0 g/kg·h (taulukot 7 ja 8). Reaktionopeudet k_n ja k_d laskettiin yhtälöistä 37 ja 38.

Taulukko 7. Reaktionopeudet eri tutkimusjaksoilla linjalla 1 (keskiarvo ja hajonta).

Table 7. Reaction rates during different periods in unit 1 (mean and deviation).

Jakso Period	k_n mg/g·h		k_d mg/g·h		k_b mg/g·h	
	\bar{x}	s	\bar{x}	s	\bar{x}	s
1	0,43	0,26	0,38	0,21	2,43	0,58
2	0,53	0,30	0,32	0,16	2,37	1,04
3	0,31	0,16	0,34	0,16	1,05	0,45
4	0,11	0,08	0,06	0,04	0,94	0,48
5	0,22	0,15	0,27	0,11	1,09	0,05
6	0,69	0,33	0,39	0,19	2,17	1,11
7	0,45	0,18	0,33	0,16	3,11	1,08
8	1,12	0,51	0,47	0,21	2,38	1,10
9	0,94	0,40	0,78	0,29	1,24	2,51
10	0,96	0,40	0,75	0,38	2,45	1,01
11	0,62	0,19	0,70	0,40	1,65	0,21
12	0,32	0,12	0,19	0,10	2,01	0,71
13	0,25	0,15	0,22	0,14	2,02	0,01
14	0,34	0,20	0,28	0,27	2,21	0,85
15	0,40	0,20	0,23	0,18	1,71	0,46
16	0,28	0,10	0,21	0,10	2,16	0,68
17	0,76	0,37	0,50	0,25	2,10	0,59
18	0,48	0,22	0,34	0,12	2,42	0,74
19	0,35	0,19	0,20	0,11	2,12	0,80
20	0,23	0,15	0,13	0,06	1,78	0,55

$$k_n = \frac{(C_{NH_4,i} - C_{NH_4,e})}{\tau \cdot MLVSS} \cdot \frac{t_a}{t_a + t_o} \quad (37)$$

$$k_d = \frac{(C_{NH_4,i} - C_{NH_4,e} - C_{NO_3,e})}{t_a + t_o} \cdot \frac{t_o}{t_a + t_o} \quad (38)$$

missä

τ on viipymä
 t_a on aerobijakson pituus
 t_o on anaerobijakson pituus

Reaktionopeudet olivat pienemmät kuin aiemmissa tutkimuksissa nd - ja an -prosesseille mitatut (Valve 1981).

Taulukko 8. Reaktiionopeudet eri tutkimusjaksolla linjalla 2 (keskiarvo ja hajonta).

Table 8. Reaction rates during different periods in unit 2 (mean and deviation).

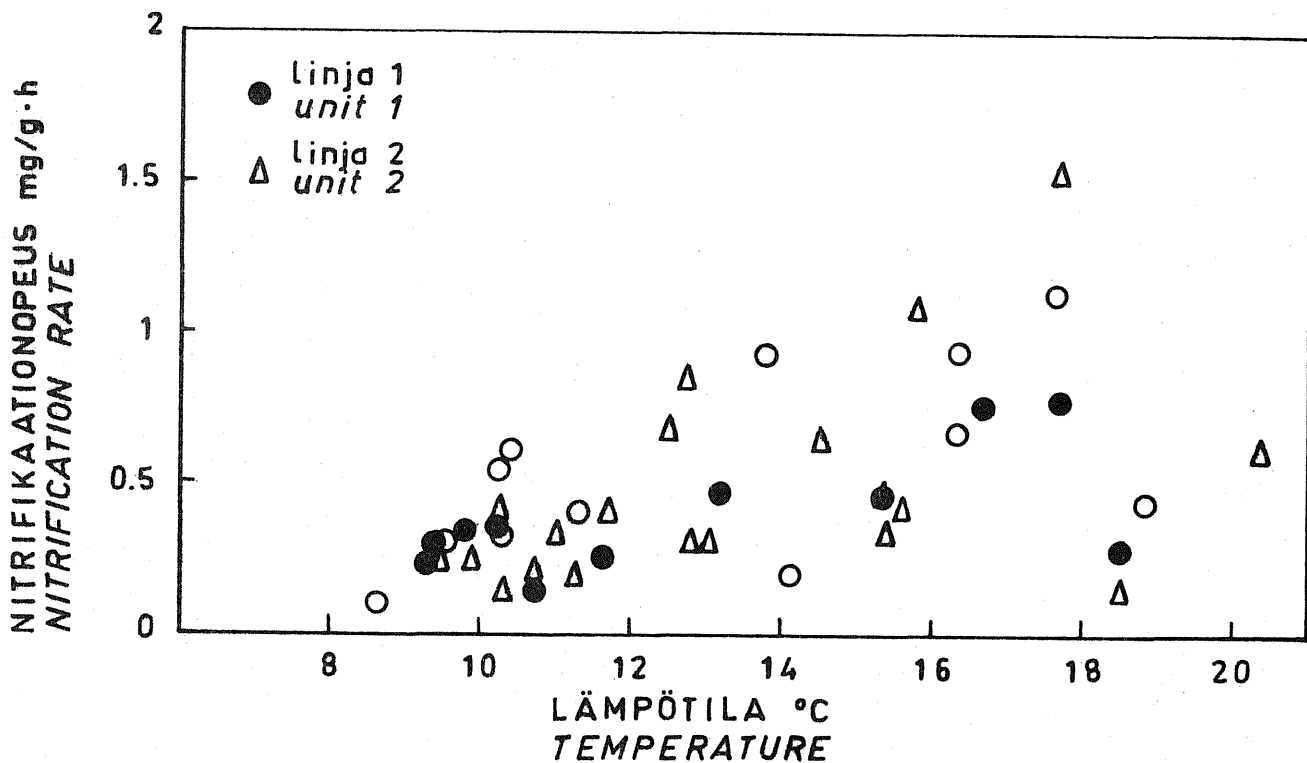
Jakso Period	k_n mg/g·h		k_d mg/g·h		k_b mg/g·h	
	\bar{x}	s	\bar{x}	s	\bar{x}	s
1	0,29	0,25	0,16	0,19	3,34	1,07
2	0,66	0,29	0,85	0,36	2,21	3,5
3	0,69	0,91	0,49	0,40	7,10	15,05
4	0,37	0,21	0,29	0,16	1,31	1,12
5	0,49	0,63	0,66	1,19	0,94	0,30
6	0,60	0,30	0,31	0,22	2,49	2,66
7	1,53	0,56	0,30	0,80	3,61	1,61
8	1,08	0,37	1,05	0,47	4,77	1,41
9	0,87	0,45	0,91	0,56	2,34	0,68
10	0,41	0,05	0,31	0,05	2,35	1,13
11	0,22	0,18	0,16	0,22	1,88	1,20
12	0,26	0,14	0,11	0,15	1,25	0,53
13	0,33	0,17	0,19	0,13	1,26	0,31
14	0,48	0,37	0,23	0,13	2,31	0,47
15	0,80	0,45	0,63	0,50	1,84	0,57
16	0,45	0,17	0,24	0,10	1,34	0,52
17	0,31	0,16	0,20	0,11	1,30	0,55
18	0,20	0,14	0,16	0,10	1,34	0,40

Reaktiionopeuksille laskettiin lineaariset regressiomallit rippumattomina muuttujina rauta-annostus, lämpötila, pH, anaerobivaiheen pituus, aerobi ja anaerobivaiheen suhde sekä lieteikä, viipymä ja lietekuorma. Kaikista mahdollisista yhdistelmistä saatiin seuraavat kertoimet sille mallille, joka antoi "parhaimman" tuloksen kun kriteerinä oli Mallow'n Cp-arvo (Mosteller & Tuckey 1977).

Nitrifikaationopeus k_n

	kerroin t-testisuure			osuus selitys- asteesta
leikkauspiste	2,94	2,04*	3,20***	
lämpötila	0,042	2,80**	3,59***	0,16
pH	-0,40	-1,94 ^o	-2,79**	0,09
rauta-annostus	-0,0021	-1,81 ^o	-2,62*	0,08
viipymä	-0,014		-2,14*	0,06

Mallin selityssaste oli 0,54, Mallowin Cp 5,54 ja F-arvo 11,0. Aineiston suuri hajonta aiheutti sen, että selityssaste jäi alhaiseksi. Nitrifikaationopeus eri lämpötiloissa on esitetty kuvassa 6.



Kuva 6. Nitrifikaationopeus eri lämpötiloissa.

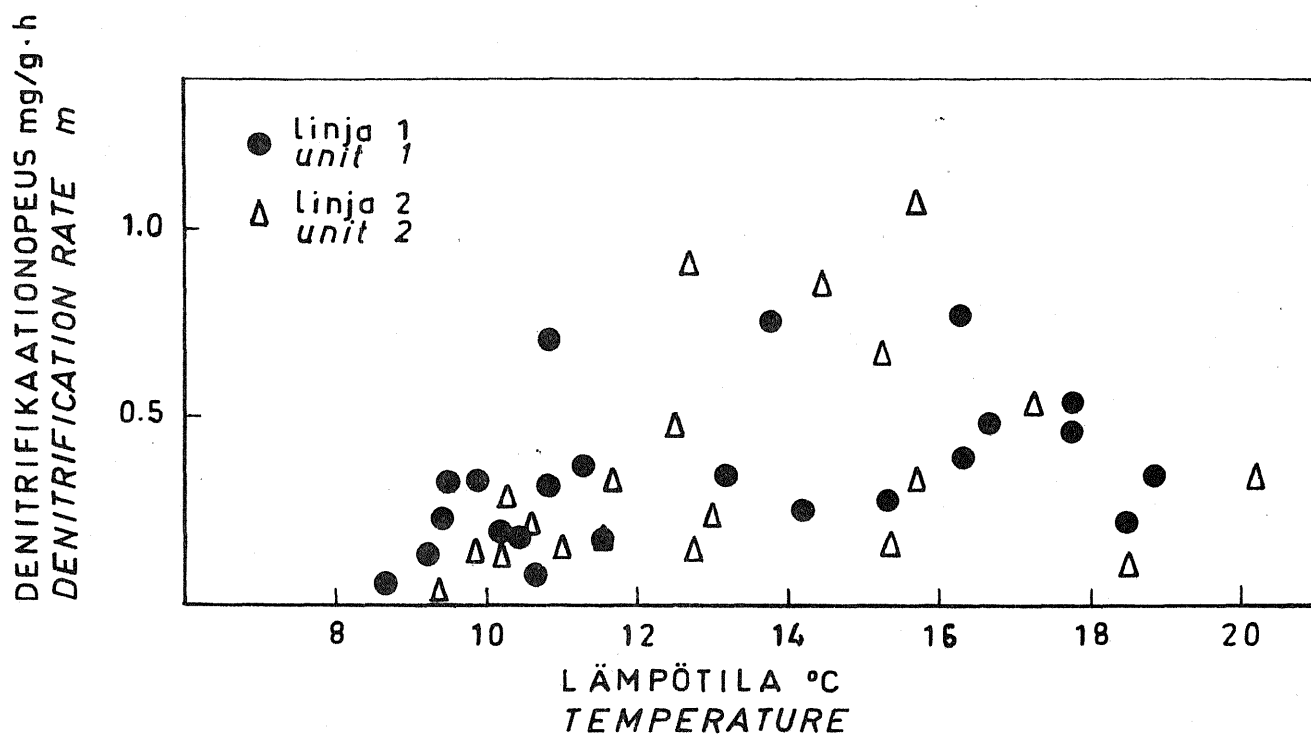
Fig. 6. Nitrification rates at different temperatures.

Denitrifikaationopeus k_d

	kerroin	t-testisuure	osuus selitys- asteesta
leikkauspiste	1,02	6,67***	
rauta-annostus	-0,003	-4,60***	0,27
viipymä	-0,019	-3,37***	0,14
anaerobivaiheen pituus	-0,0026	-2,02*	0,05

Tässä mallissa Mallowin C_p arvo oli 2,58, selitysaste 0,50 ja F-testisuure 13,2. Rauta-annostuksen, viipymän ja anaerobivaiheen pituuden kertoimet poikkesivat nollasta alle 5 %:n riskitason. Mallin selitysaste jäi heikoksi. Erityisen mielenkiintoinen on havainto raudan negatiivisesta vaikutuksesta denitrifikaationopeuteen. Syynä saattaa olla rautahydroksidin aiheuttama nitrifikaatioionien diffuusionopeuden hidastuminen niiden tunkeutuessa flokin sisälle. Denitrifikaationopeus eri lämpötiloissa on esitetty kuvassa 7.

Kaiken kaikkiaan typenpoisto jäi oletettua heikommaksi. Esimerkiksi täyden mittakaavan tutkimuksissa, joissa sekoitusta ei oltu järjestetty tehokkaaksi anaerobivaiheen aikana, saavutettiin keskimäärin 76 %:n typpiireduktio kun jaksotus oli 0,5/1,0 h, viipymä n. 1 d ja lämpötila n. 13 °C (Viitasaari 1976). Syy heikkoon tulokseen lienee tulevan jäteveden sisältämät myrkylliset yhdisteet sekä voimakkaat laadun vaihtelut.



Kuva 7. Denitrifikaationopeus eri lämpötiloissa.

Fig. 7. Denitrification rates at different temperatures.

4.4 FOSFORI

Kokonaisfosfori käsiteltyssä vedessä rinnakkaissaostuksen aikana oli 0,8–2 mg/l ja liukoinen fosfori 0,1–1,0 mg/l (taulukot 5 ja 6).

Kokonaisjäännösfosforin logaritmin riippuvuutta Fe:P moolisuhteen logaritmistä (log M), alkaliteetista, pH:sta ja lämpötilasta voitiin kuvata regressiomallilla seuraavasti:

	regressiokerroin	t-testi	osuus selitysasteesta
leikkauspiste	-0,76	-3,38***	
log M	-0,24	-15,69***	0,37
pH	0,078	2,16*	0,007
lämpötila	0,025	6,34***	0,06
alkaliteetti	0,030	1,41	0,003

Mallin selitysaste on 0,52, Mallowin Cp 5,00 ja F-arvo 85,4. Alkaliteetin kerroin ei merkitsevästi poikkea nolasta, joten se voidaan jättää pois ilman, että se vaikuttaa mallin tilastolliseen merkitsevyyteen.

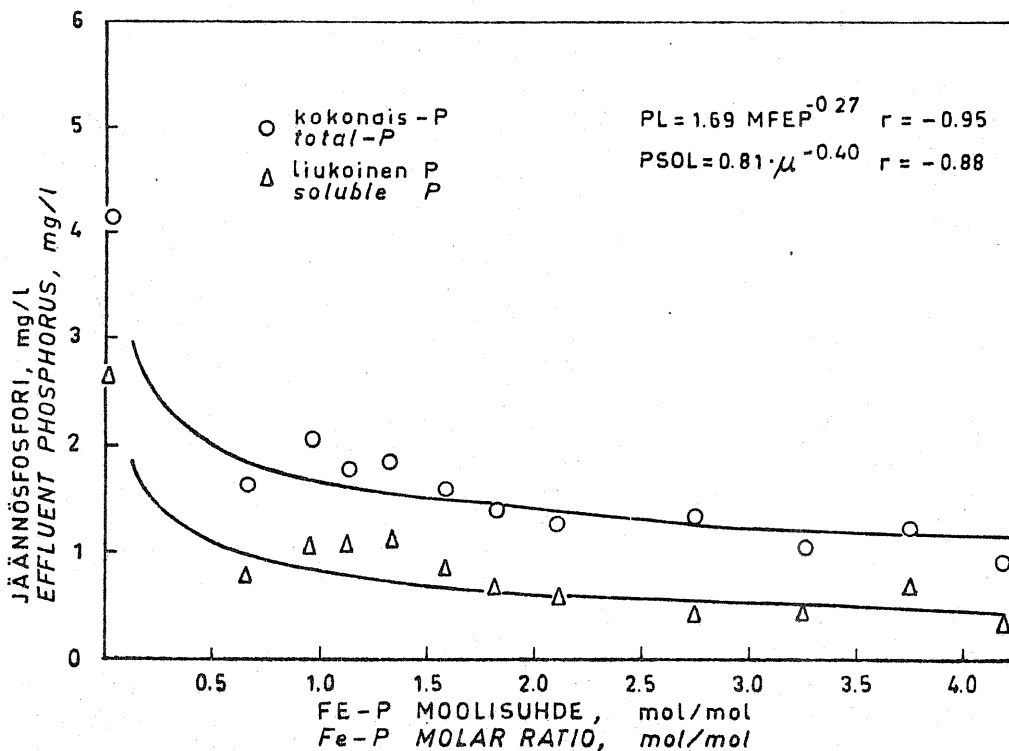
Liukoisen jäännösfosforin logaritmi voitiin vastaavasti kuvata seuraavasti:

regressiokerroin t-testi osuus selitys-
asteesta

leikkauspiste	-1,93	-5,08***	
log M	-0,36	-13,86***	0,31
pH	0,14	2,27*	0,008
lämpötila	0,051	7,53***	0,09
alkaliteetti	0,052	1,48	0,004

Mallin selitysaste oli 0,49, Mallowin Cp 5,00 ja F-arvo 75,4, Alkaliteetin osalta voidaan todeta samoin kuin kokonaisfosforia kuvaavassa mallissa, että se voidaan jättää huomiotta.

Kun jäännösfosfori jaettiin 12 Fe:P-moolisuhdeluokkaan saatiin kuvan 8 mukainen esitys. Verrattuna aiempaan tutkimukseen (Valve 1981) oli tässä tapauksessa saatu kuvaaja loivempi l. jäännösfosfori pitoisuus ei riippunut yhtä voimakkaasti moolisuhteesta kuin nd- ja dn-prosesseista. Moolisuhteella 1 oli kokonaisjäännösfosfori tässä tutkimuksessa n. 1,8 mg/l ja liukoinen n. 0,9 mg/l ja moolisuhteella 2,5 1,5 mg/l ja 0,6 mg/l. nd- ja dn-prosessien vastaavat arvot olivat moolisuhteella 1 2,2 mg/l ja 1,8 mg/l ja moolisuhteella 2,5 1,1 mg/l ja 0,6 mg/l.



Kuva 8. Kokonaisfosfori ja liukoinen fosfori puhdistetussa jätevedessä eri Fe:P moolisuhteilla.

Fig. 8. Total and soluble phosphorus in effluent at different Fe:P molar ratios.

Yhteenvedona on todettava, että fosforinpoiston osalta ei saavutettu sellaisia tuloksia, jotka ovat mahdollisia parhaalla mahdollisella tavalla ohjatuilla rinnakkaissaostuslaitoksilla. Näissä jäännösfosforipitoisuus on alle 1 mg/l moolisuhteella 1,5.

4.5 ORGAANISTEN YHDISTEIDEN POISTO

Prosessin kyky poistaa orgaanisia yhdisteitä (ilmaistuna BOD₇-lukuna ja KMnO₄-kulutuksena) oli muutamia poikkeuksia lukuunottamatta kohtuullinen. Jäännös BOD₇ oli yleensä alle 25 mg/l ja COD (KMnO₄) alle 70 mg/l (taulukot 5 ja 6, kuva 9). Mitään merkitseviä riippuvuuksia ei löydetty jäännöspitoisuuksien ja prosessiparametrien välillä.

4.6 JÄÄNNÖSKIINTOAINE JA RAUTA

Jäännöskiintoainepitoisuus oli kummallakin linjalla varsin suuri, 20-45 mg/l. Minkäänlaisia riippuvuuksia ei ollut prosessiparametrien suhteen (taulukko 5 ja 6).

Jäännösrautapitoisuus oli kummallakin linjalla yleensä 1-2 mg/l ja liukoinen rautapitoisuus alle 0,1 mg/l. Jäännösraudan ja rauta-annostuksen välinen korrelaatio oli 0,81***. Liukoinen raudan ja rauta-annostuksen välinen korrelaatio oli 0,71***. Muita merkitseviä riippuvuuksia ei löydetty (taulukko 5 ja 6).

4.7 LIETTEEN OMINAISUUDET

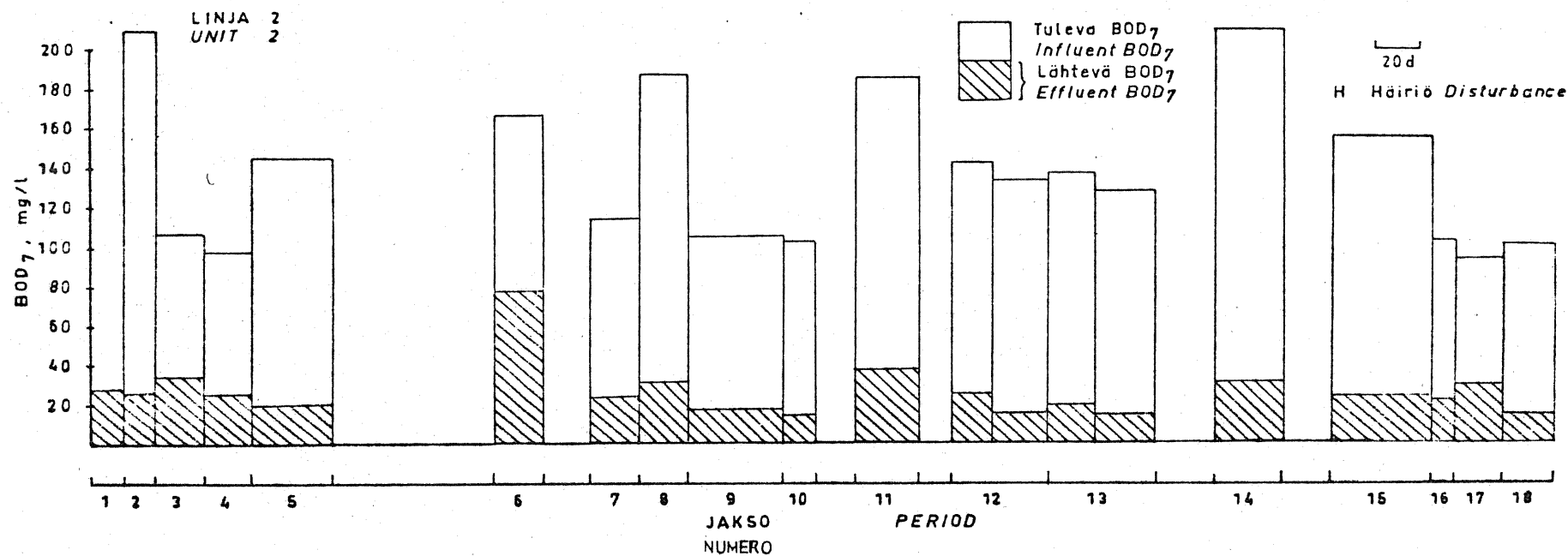
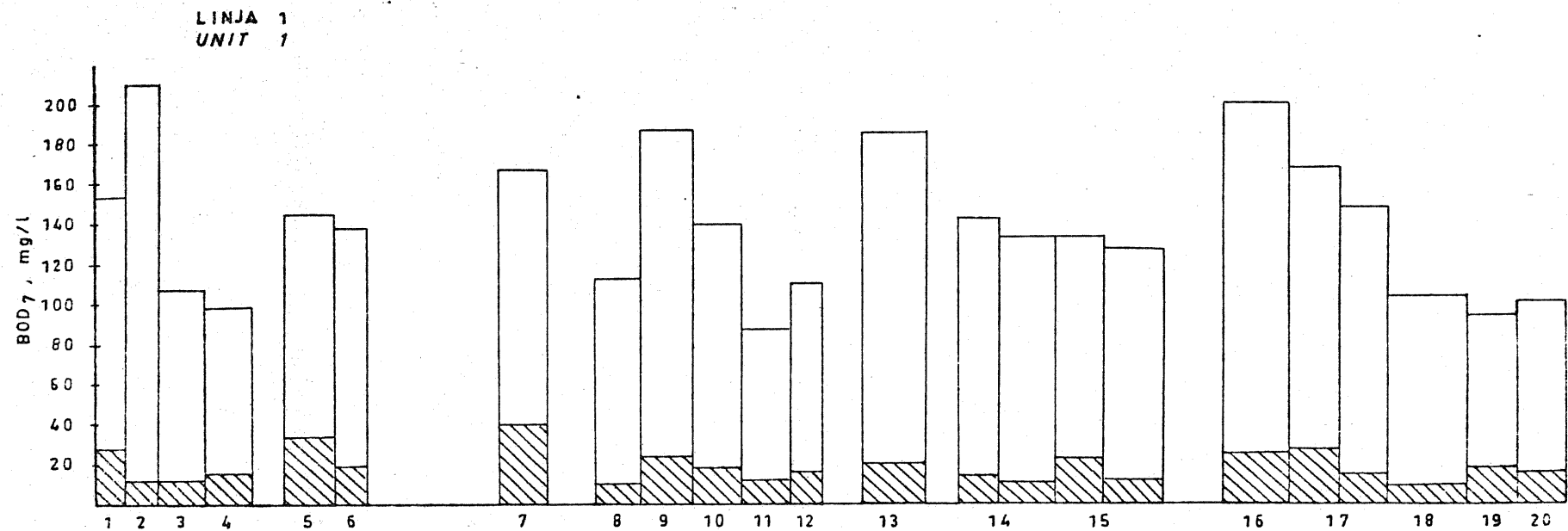
Lietepitoisuus oli linjalla 1 4,7-15 kg/m³ ja linjalla 2 6-13 kg/m³. Hehkutushäviö oli 61-64 % linjalla 1 ja 72-74 % linjalla 2 silloin, kun rautaa ei syötetty.

Lieteindeksi oli linjalla 1 60-135 g/ml ja linjalla 2 80-170 g/ml.

Lieteindeksin arvot eivät ole luotettavia silloin, kun lietepitoisuus oli yli 7 kg/m³ ja 0,5 h laskeuma yli 700 ml/l, koska lieteindeksiä ei määritetty laimennetuista näytteistä. Lieteindeksin riippuvuutta pyrittiin kuitenkin kuvaamaan regressiomallilla, jonka riippumattomina muuttujina olivat rauta-annostus, lämpötila, pH ja lietekuorma. Parhaassa mallissa oli kuitenkin mukana vain kaksi ensinmainittua muuttujaa.

	regressiokerroin	t-testi	osuus selitysasteesta
leikkauspiste	155	22,14***	
rauta-annostus	-0,31	-7,54***	0,17
lämpötila	-2,29	-4,62***	0,06

Mallin selityssasteeksi jäi vain 0,27, mutta Mallowin Cp oli 2,75 ja F-arvo 45,0. Lietteen rautapitoisuus oli rinnakkaissaostuslietteessä 7-14 % ja biologisessa lietteessä linjalla 2 jaksojen 1-10 aikana 0,8-3 % (taulukko 9 ja 10). Lietteen ylimalkainen mikroskooppitarkastelu ei yleensä osoittanut poikkeamia Suomenojan tutkimusaseman isojen biologisten yksiköiden lietteessä.



Kuva 9. Tuleva ja lähtevä BOD₇.

Fig. 9. Influent and effluent BOD₇.

Taulukko 9. Lietteän ominaisuudet eri jaksoilla linjalla 1.
 Table 9. Properties of sludge during different periods in unit 1.

Jakso Period	MLSS, g/l ³		MLVSS, g/l ³		1/2 h las- keuma, ml/l 1/2 h settling		SVI, ml/g		Lietteän Fe-pitoisuus, % Fe content in sludge, %	
	x	s	x	s	x	s	x	s	x	s
1	3,19	1,09	5,60	0,93	972	8	118	14	8,8	0,4
2	10,84	1,12	6,96	0,74	977	5	91	10	-	-
3	10,72	2,45	6,52	1,61	980	14	101	33	11,2	0,4
4	11,95	1,45	7,02	0,89	980	6	83	9	12,0	1,3
5	15,80	1,50	9,85	1,61	943	8	60	6	6,6	-
6	9,52	0,02	5,69	0,16	971	8	102	-	-	-
7	8,16	1,50	4,75	1,08	923	24	122	23	5,3	-
8	6,85	0,35	4,24	0,60	286	31	42	3	9,4	0,1
9	8,81	1,45	5,39	1,14	824	52	91	4	9,4	3,2
10	9,09	0,97	5,55	0,66	885	35	99	15	8,0	0,2
11	9,63	0,54	5,85	0,69	910	9	95	5	10,6	1,8
12	9,72	0,43	5,64	0,13	887	13	91	4	12,1	0,6
13	6,73	0,56	4,18	0,38	895	90	135	22	-	-
14	7,29	1,22	4,53	0,75	940	9	136	47	10,0	1,8
15	8,91	1,54	5,49	0,99	932	14	102	15	4,5	-
16	10,11	0,95	6,31	0,58	880	12	89	8	9,1	0,8
17	8,13	1,04	5,15	0,70	743	84	92	10	7,1	2,1
18	4,69	0,80	2,95	0,50	284	79	61	10	12,9	3,6
19	4,69	0,45	2,89	0,33	290	18	63	6	13,8	0,3
20	5,09	1,08	3,32	0,90	439	154	85	20	-	-

Taulukko 10. Lietteän ominaisuudet eri jaksoilla linjalla 2.
 Table 10. Properties of sludge during different periods in unit 2.

Jakso Period	MLSS, g/l ³		MLVSS, g/l ³		1/2 h las- keuma, ml/l 1/2 h settling		SVI, ml/g		Lietteän Fe-pitoisuus, % Fe content in sludge, %	
	x	s	x	s	x	s	x	s	x	s
1	7,25	1,12	5,86	0,85	889	131	126	23	0,8	0,1
2	7,00	1,00	5,69	0,79	900	20	131	23	-	-
3	4,85	1,90	3,72	1,46	818	276	162	61	2,3	0,2
4	6,09	0,99	4,44	0,72	983	4	168	36	1,8	0,4
5	13,33	2,70	9,20	3,34	964	49	76	21	0,8	-
6	7,12	1,90	5,09	1,49	784	288	102	40	3,0	-
7	4,88	0,85	3,53	0,69	486	133	97	34	2,5	0,7
8	6,39	0,56	4,41	0,49	869	21	138	16	1,9	0,1
9	6,54	1,04	4,64	0,90	858	25	138	31	1,7	0,1
10	5,96	0,45	4,36	0,58	861	25	144	12	1,4	-
11	6,85	0,53	4,46	0,38	844	140	127	22	-	-
12	5,08	0,34	3,35	0,33	496	89	98	19	9,0	3,1
13	5,66	0,85	3,65	0,56	624	128	118	23	5,7	4,2
14	8,87	0,66	5,73	0,44	735	143	83	15	8,8	1,0
15	7,06	0,97	4,56	0,65	671	174	94	24	9,5	1,8
16	6,08	0,42	3,86	0,22	707	115	116	17	10,7	0,2
17	6,47	0,37	4,16	0,25	906	66	141	12	10,9	1,1
18	7,21	0,25	4,66	0,16	964	10	134	5	-	-

Yhteenvedona voidaan todeta, että liete oli laskeutumisominaisuuksiltaan tavanomaista mutta laskeutuksen jälkeen jäi lietepatjan yläpuolinen vesikerros sameahkoksi. Tämä näkyi selvästi korkeahkoina karkaavan kiintoaineen pitoisuuksina.

4.8 LIETTEEN TUOTTO

Lietteen tuotto laskettiin yhtälöistä 39 ja 40 käyttäen jaksojen keskiarvoja

$$\Delta MLSS = \frac{MLSS \cdot V}{0,024 \cdot G \cdot BOD_i \cdot Q} \quad (39)$$

$$\Delta MLVSS = \frac{MLVSS \cdot V}{0,024 \cdot G \cdot BOD_i \cdot Q} \quad (40)$$

Ylijäämälietteen tuotto on yleensä muotoa

$$\Delta MLVSS = a \cdot \Delta BOD - b \cdot V \cdot MLVSS \quad (41)$$

missä

$\Delta MLVSS$ on ylijäämälietteen määrä, kg/d
 a on tuottokerroin
 ΔBOD on poistettu BOD-määrä, kg/d
 b on endogeenihengityskerroin

Jakamalla yhtälö (41) ΔBOD :llä ja olettamalla, että $\Delta BOD = q \cdot BOD_i$ voidaan kirjoittaa lietteen tuotolle yhtälö (42)

$$Y_t = a - \frac{b}{LK} \quad (42)$$

missä LK on lietekuorma, kg/kg·d

Jaksojen arvoista lasketun regressiomallin kertoimet olivat seuraavat

	kerroin	t-testisuure
leikkauspiste, a	0,38	
$1/LK$, b	0,017	3,30**

Mallin selitysaste oli vain 0,21 ja Cp-arvo ja F-arvo 10,9.

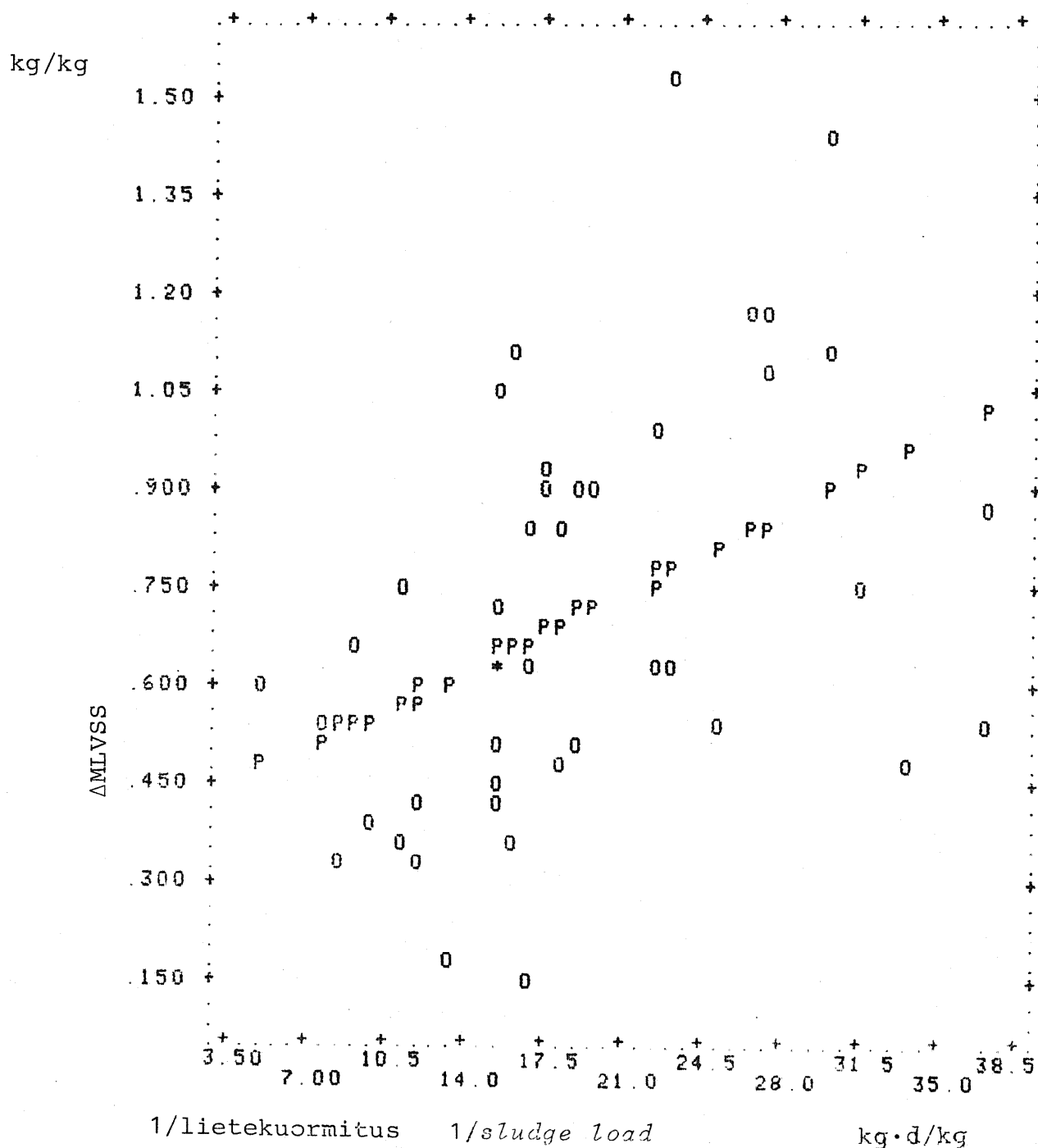
Kun $\Delta MLVSS$:n sijaan otettiin $\Delta MLSS$ oli malli seuraava:

	kerroin	t-testisuure
leikkauspiste, a	0,56	
$1/LK$, b	0,028	3,50**

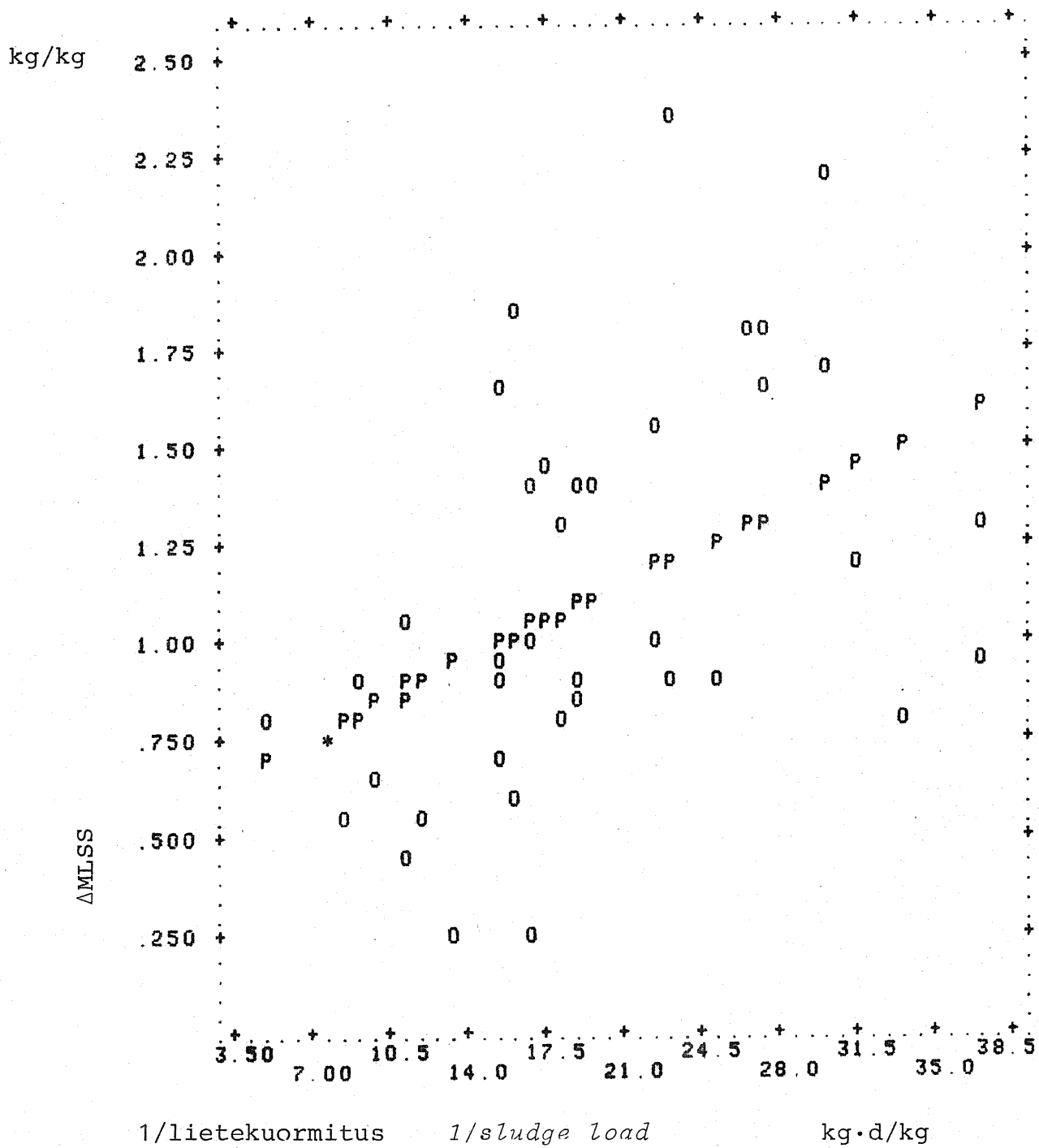
Selitysaste oli 0,23, Cp-arvo 4,17 ja F-arvo 12,3.

Muita selittäviä muuttujia ei lietteen tuotolle löytynyt.

Yleisesti käytetään lietteen tuoton määrittämiseksi kertoimelle a arvoa 0,60-0,70 kg/kg ja b 0,070-0,08 1/d, joten tässä tutkimuksessa saadut arvot a vastaavat yleisesti käytettyä arvoa mutta b:n arvo poikkeaa erittäin merkitsevästi kirjallisuuden arvoista. Kuvassa 10 ja 11 on esitetty lietteen tuoton ja lietekuorman käänteisarvon välinen yhteys.



Kuva 10. Lasketun (P) ja havaitun (O) lietetuoton ($\Delta MLVSS$) ja lietekuormituksen käänteiseron välinen yhteys.
 Fig. 10. Predicted (P) and observed (O) sludge production ($\Delta MLVSS$) as a function of $1/sludge\ load$.



Kuva 11. Lasketun (P) ja havaitun (O) lietetuoton (Δ MLSS) ja lietekuormituksen käänteiseron välinen yhteys.

Fig. 11. Predicted (P) and observed (O) sludge production (Δ MLSS) as a function of 1/sludge load.

5. JOHTOPÄÄTÖKSET JA YHTEENVETO

Jaksottaiseen ilmastukseen perustuvalla biologisella nitrifikaatio-denitrifikaatioprosessilla, johon oli liitetty fosforin rinnakkaissaostus ferrosulfaatilla saavutettiin parhaimmillaan noin 80 % typenpoisto. Keskimäärin oli typpireduktio noin 50 %. Nitritifikaatioaste pystyttiin pitämään yli 80 % suurimman osan tutkimusajasta, joten denitrifikaatio muodostui typenpoiston rajoittavaksi tekijäksi.

Eri tekijöiden vaikutusta typenpoistoon ja reaktionopeuksiin pyrittiin kuvaamaan regressioanalyysin avulla mutta esim. nitritifikaatioastetta ja nitritifikaationopeutta eri prosessiparametreista ei regressioanalyysin avulla voitu arvioida luotettavasti. Nitritifikaatioaste pieneni hieman kun anaerobivaiheen kestoa lisättiin jakotussuhteen pysyessä vakiona. Tämä tukee sitä aikaisemmin tehtyä havaintoa, että anaerobiset olosuhteet yhdessä ferrosulfaatin kanssa saattavat aiheuttaa nitritifikaation myrkyttymistä. Nitritifikaationopeus aleni lämpötilan laskiessa mutta vaikutus oli varsin vähäinen tutkitulla lämpötila-alueella 10-17°C. Rauta-annostus ei tilastollisen tarkastelun perusteella vaikuttanut nitritifikaationopeuteen, kun annostelu oli 16-31 g/m³ Fe²⁺.

Denitrifikaationopeus oli 0,1-1,0 mg/g·h. Denitrifikaationopeus riippui mm. rauta-annostuksessa siten, että se pieneni annostuksen kasvaessa. Tämä saattoi viitata joko suoraaniseen inhibitiivaikutukseen tai todennäköisemmin aktiivilieteflokkien pinnalle saostuvan rautahydroksidin nitraatti-ionien diffuusiota hidastavaan vaikutukseen. Tämä vaikutus voidaan mahdollisesti osoittaa muuttamalla turbulenssia ja näin flokkien kokoa. Denitrifikaationopeuteen vaikuttivat vähentävästi myös viipymän ja anaerobivaiheen pituuden lisääntyminen.

Sekä nitritifikaationopeudelle että denitrifikaationopeudelle laaditut regressiomallien selitysasteet jäivät alhaisiksi todennäköisesti siksi, että prosessit olivat jatkuvassa muutostilassa ja myös mahdollisesti laboratoriomääritysten epätarkkuuden vuoksi. Erityisesti havaittiin myöhemmin tehdyissä tarkistuksissa, että Orionin nitraattielektrodi antoi vanhetessaan jätevedessä 10-50 % liian suuria arvoja verrattuna tavanomaisiin menetelmiin.

Orgaanisten yhdisteiden poisto (BOD,COD) oli kummallakin linjalla tavanomainen, mutta jäännöskiintoainepitoisuus korkeahko. Tämä siitä huolimatta, että lieteindeksi yleensä oli 80-130 ml/g. Karkaava hieno kiintoaines johtui todennäköisesti prosessin suuresta lieteiästä (yli 30 d) ja mahdollisesti myös selkeyttämössä tapahtuvasta denitrifikaatiosta. Kuplimista ei kuitenkaan havaittu jälkiselkeytyksessä, mutta lietettä nousi ajoittain selkeyttämön pinnalle.

Jäännösfosforipitoisuus oli noin 2 mg/l josta liukoisen fosforin osuus noin 1 mg/l. Parhaimmat tulokset saavutettiin Fe:P moolisuhteella 2,5 jolloin jäännösfosfori oli noin 1,5 mg/l josta liukoisen fosforin osuus noin 0,7 mg/l. Fosforinpoisto oli näinollen jonkin verran heikompi kuin hyvin toimivissa tavanomaisissa rinnakkaissaostuslaitoksissa.

Käsitellyn jäteveden pH-arvo oli kummallakin linjalla yli 6,5 mikä osoittaa sen, että denitrifikaatio kumoaa osittain nitrifikaation aiheuttaman alkaliteetin vähenemisen. Jäännösalkaliteetti oli yleensä yli 1 mmol/l.

Tämän tutkimuksen perusteella ei jaksottainen ilmastus sovellu tapauksiin, joissa pyritään erityisen korkeaan typenpoistoon. Lähinnä prosessi soveltuu parhaiten vähentämään nitrifioivan laitoksen alkalin tarvetta sekä myös vähentämään energiankulutusta, koska nitrifikaatiossa typpeen sidottu happi saadaan osittain uudelleen käyttöön. Teknisenä rajoituksena on ilmastintyyppi: pohjailmastimet eivät sovellu tukkeutumisen vuoksi. Mekaaniset ilmastimet sekä erillinen hämmennys lietteen pitämiseksi sekoittuneena lieenee paras menetelmä. Ilmastusaltaan tulisi olla syvä, jotta ilmakehästä ei liukenisi happea anaerobivaiheen aikana. Vaihtoehtoisesti voidaan allas kattaa.

Laitossuunnittelussa mitoituksen kriteerinä tulee olla lieteikä. Vaadittava minimilieteikä riippuu nitrifikaatiobakteerien asettamista vaatimuksista ja sen arvioinnissa on otettava huomioon paitsi jäteveden laatu ja lämpötila, myös jaksotus, koska nitrifioivat bakteerit eivät kasva anaerobivaiheen aikana, Jaksotusta valittaessa ei tulisi käyttää 0,5 h lyhyempiä tai 2 h pitempiä yhtämittaisia anaerobivaiheen aikoja. Jos jakso jää liian lyhyeksi, ei nitraattirespiraatio ehdi kunnolla käynnistyä ja jos se on liian pitkä, estyy nitrifikaatio. Mitotusparametrit olisi ainakin tämän päivän tietämyksen perusteella etsittävä koetoiminnan perusteella, koska kaikkien tekijöiden vaikutusta ei vielä riittävän tarkasti voida arvioida.

KIRJALLISUUS

Mosteller, F. & Tuckey, J.W., Data analysis and regression, a second course in statistics, Addison-Wesley Publishing Company, Reading, Mass. 1977, s. 58.

Valve, M., Ravinteiden poisto biologisessa puhdistuksessa. Väliraportti 2. Vesihallituksen monistesarja 1981: 52, Helsinki 1982, 88 s.

Viitasaari, M., Jäteveden pitkäilmastus-simultaanisaostuksen reaktionopeuksista ja niihin vaikuttavista tekijöistä, Vesientutkimuslaitoksen julkaisuja 16, Helsinki 1976, 105 s.

SYMBOLIT JA LYHENTEET

a	on	lietteen tuottokerroin	kg/kg
A	on	alkaliteetti	mmol/l
b	on	endogeenihengitysvakio	1/d
b_b	on	heterotrofisten bakteerien endogeenihengityskerroin	1/d
b_n	on	nitrifikaatiobakteerien endogeenihengityskerroin	1/d
b_d	on	heterotrofisten bakteerien endogeenihengityskerroin anaerobivaiheen aikana	1/d
BOD ₇	on	biokemiallinen hapenkulutus	mg/l
c	on	pitoisuus, alaindeksi viittaa yhdisteeseen ja näytepisteeseen	mg/l
c_{Fe}	on	rautapitoisuus	mg/l
c_N	on	kokonaistypen pitoisuus	mg/l
c_{NH_3}	on	ammoniumtypen pitoisuus	mg/l
c_{NO_2}	on	nitriittityypen pitoisuus	mg/l
c_{NO_3}	on	nitraattityypen pitoisuus	mg/l
c_P	on	fosforipitoisuus	mg/l
c_{PL}	on	liukoisen fosforin pitoisuus	mg/l
c_S	on	orgaanisten yhdisteiden pitoisuus	mg/l
COD	on	kemiallinen hapenkulutus (KMnO ₄ -luku)	mg/l
f_n	on	nitrifioivien bakteerien osuus lietteessä	
G	on	lieteikä	d
G_{Fe}	on	lieteikä lietteen rautapitoisuuden perusteella	d
k_a	on	alkaliteetin muutosnopeus aerobioloissa	mol/m ³ ·h
k_b	on	BOD ₇ -poistumisnopeus	g/kg·h
\bar{k}_b	on	BOD ₇ -poistumisnopeus	g/m ³ ·h
k_b^*	on	heterotrofisten bakteerien kasvunopeus	g/g·h
\bar{k}_b^*	on	heterotrofisten bakteerien kasvunopeus	g/m ³ ·h
k_d	on	denitrifikaationopeus	g/kg·h
\bar{k}_d	on	denitrifikaationopeus	g/m ³ ·h
k_f	on	suurimman ja keskimääräisen ammoniumpitoisuuden suhde	
k_n	on	nitrifikaationopeus	g/kg·h
\bar{k}_n	on	nitrifikaationopeus	g/m ³ ·h
k_n^*	on	nitrifikaatiobakteerien kasvunopeus	g/g·h
\bar{k}_n^*	on	nitrifikaatiobakteerien kasvunopeus	g/m ³ ·h
k_{2a}	on	alkaliteetin muutosnopeus nitraattirespiraatioissa	mmol/m ³ ·h

k_{2b}	on	BOD ₇ :n hapetusnopeus nitraattirespi- raatiossa	g/kg·h
k_{2b}^*	on	heterotrofisten bakteerien kasvunopeus nitraattirespiraation aikana	g/g·h
K_s	on	Michaelin vakio, alaindeksi viittaa yhdisteeseen	mg/l
K_{s,NH_3}	on	Michaelin vakio ammoniumtypelle	mg/l
K_{s,NO_2}	on	Michaelin vakio nitriittitypelle	mg/l
K_{s,NO_3}	on	Michaelin vakio nitriittitypelle	mg/l
$K_{s,s}$	on	Michaelin vakio BOD ₇ :lle	mg/l
LA	on	1/2 h laskeuma	ml/l
LK	on	lietekuorma	kg/kg·d
MLSS	on	lietepitoisuus	g/l
MLVSS	on	lietteen hehkutushäviö	g/l
q	on	virtaama	m ³ /h
q _r	on	palautuslietteen virtaama	m ³ /h
q _y	on	ylijäämälietteän virtaama	m ³ /h
S	on	orgaaninen substraatti, (BOD ₇)	g/m ³
t	on	aika	h
t _a	on	aerobivaiheen pituus	h
t _o	on	anaerobivaiheen pituus	h
T	on	lämpötila	°C
V	on	tilavuus	m ³
X	on	nitrifikaatiobakteerien pitoisuus	g/m ³
Z	on	heterotrofisten bakteerien pitoisuus	g/m ³
Y _b	on	heterotrofisten bakteerien saanto	g/g
Y _{bd}	on	hapettunut liete/pelkistynyt nitraatti	g/g
Y _{bn}	on	hapettunut org. yhd./pelkistynyt nit- raatti	g/g
Y _n	on	nitrifikaatiobakteerien saanto	g/g
Δ	on	ylijäämälietteän poisto	%/d
ΔBOD	on	BOD-poisto	g/d
ΔMLSS	on	lietteen tuotto	g/d
ΔMLVSS	on	lietteen tuotto (org.)	g/d
μ _b	on	heterotrofisten bakteerien ominais- kasvunopeusvakio	1/d
μ _n	on	nitrifikaatiobakteerien ominaiskasvu- nopeusvakio	1/d

